

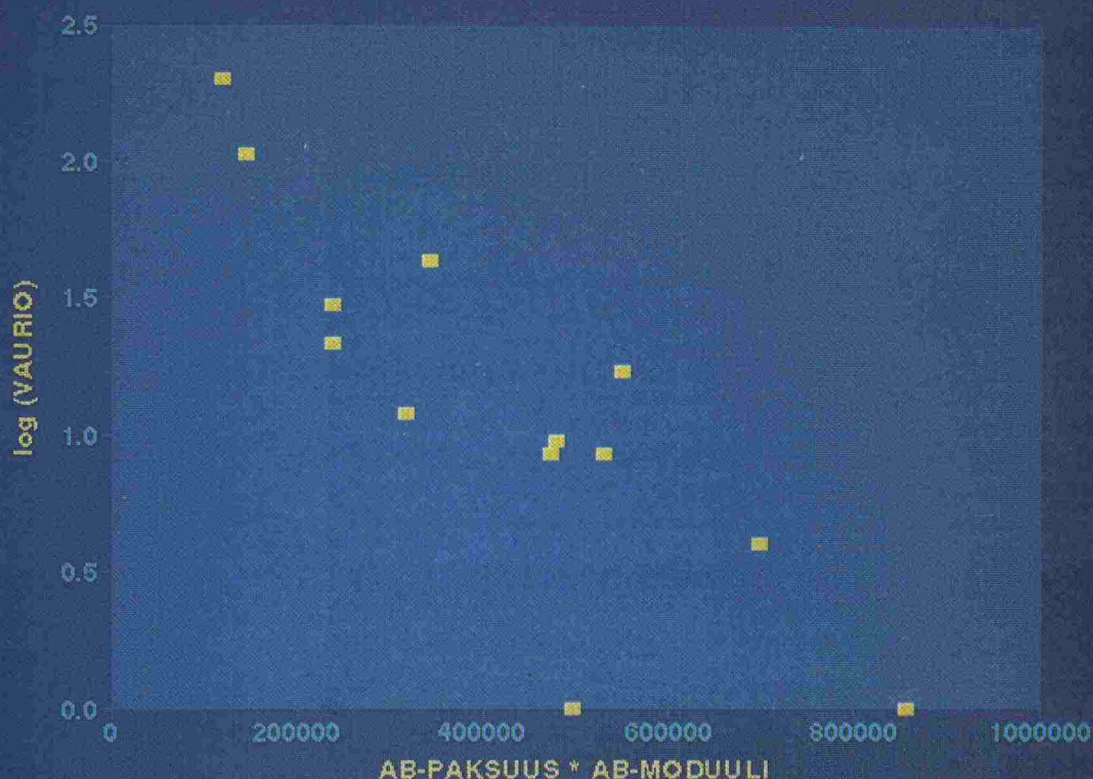


Tielaitos

Heikki Jämsä, Harri Spoof

## Strategic Highway Research Program (SHRP), Long-Term Pavement Performance (LTPP)

Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja tierakenteen  
vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät



Tielaitoksen  
selvityksiä

35/1993

Helsinki 1993

Geokeskus

**Tielaitoksen selvityksiä  
35/1993**

**Heikki Jämsä, Harri Spoof**

**Strategic Highway Research  
Program (SHRP), Long-Term  
Pavement Performance (LTPP)**

Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja  
tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät

**Tielaitos  
Geokeskus**

**Helsinki 1993**

ISSN 0788-3722  
ISBN 951-47-7664-X  
TIEL 3200160  
Painatuskeskus Oy  
Helsinki 1993

Julkaisua myy:  
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,  
painotuotemyynti  
Telefax (90) 1487 2652

**Tielaitos**

Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

**JÄMSÄ Heikki, SPOOF Harri: STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (SHRP), LONG-TERM PAVEMENT PERFORMANCE (LTPP). Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät.**

Helsinki 1993, Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 35/1993, 43 s. + liitt. 3 s, ISBN 951-47-7664-X, ISSN 0788-3722, TIEL 3200160

**Avainsanat** koetie, rakenteen käyttäytyminen, kantavuus, vaurioituminen, mallintaminen, vaurioennuste, kestoikä

## Tiivistelmä

SHRP-LTPP tutkimuksen tavoitteena on Suomen/Pohjoismaiden olosuhteisiin soveltuviin teiden rakenteellisten vaurioitumismallien kehittäminen. Tätä tarkoitusta varten on valittu 18 kohdetta AB + kant. (asfalttibetonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-1) sekä 28 kohdetta 2AB + kant. (uudelleenpäällystetty asfalttibetonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-6) rakenteita.

Koeteiltä on kerätty rakennetiedot (päällysteen paksuus, rakennekerrosten paksuudet), materiaalitiedot (materiaalinäytteet kustakin kerroksesta ja pohjamaasta), vauriotiedot (tyyppi, määrä, vaurioaste), kantavuus-, tasaisuus- sekä urasyvyystiedot.

Rakennekerrosten materiaalimoduulit on laskettu SHRP:n käyttämän Modulus-ohjelman perusteella. Laskelmat tehtiin kullekin mittauspisteelle erikseen (mittauspisteiden etäisyys 7.5 m), joiden perusteella laskettiin kohteen keskiarvotieto päällysteelle, sitomattomille kerroksille ja pohjamaalle erikseen. Tulosten perusteella voidaan todeta, että saadut moduuliarvot ovat järkeviä ja vastaavat hyvin mitoituksessa käytettäviä arvoja. Moduulien vaihtelu koeosuuden sisällä oli yleensä vähäistä.

Analyttisten vaurioitumismallien laatimiseksi on kullekin koeosuudelle laskettu liikennekuormituksesta aiheutuvat päällysteen alareunan vetomuodonmuutosten suuruudet. Laskelmat on tehty BISAR-monikerrosohjelmalla. Muodonmuutosten perusteella määritettiin kunkin rakenteen kuormituskertaluku SHELLin väsymissuoran perusteella. Tulokset osoittavat rakenteiden kokonaiskuormituskertaluvun olevan  $10^5$  -  $10^8$  välillä (8 tonnin akselipaino), mikä vastaa neljännen potenssin säännön perusteella 10 tonnin akselipainoiksi muutettuna hyvin Suomessa mitoituksessa käytettäviä tavoitteellisia kuormituskertalukuarvoja.

Tierakenteen vaurioitumista selittää erittäin merkittävästi päällysteen alareunan vetomuodonmuutoksen sekä kumulatiivisen kuormituskertaluvun yhdysvaikutus. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pieni muodonmuutos yhdistettynä suureen kuormituskertalukuun aiheuttaa saman vaurioitumisvaikutuksen kuin suuri muodonmuutos ja alhainen kuormituskertaluku. Tämä on tierakenteen väsymisteorian mukainen tulos, joka osoittaa mekanistisen mitoitusmenetelmän ja tierakenteen vaurioitumisen välisen loogisen yhteyden.



Vaurioitumista merkittävästi selittäviä rakennemuuttujatietoja ovat AB + kant. rakenteella päällysteen paksuus ja moduuli ja 2AB + kant. rakenteella päällysteen paksuus. Myös tierakenteen iällä on odotusten mukaisesti selvä vaikutus vaurioiden syntymiseen.

## **Esipuhe**

Suomi ja muut Pohjoismaat (Ruotsi, Norja, Tanska) osallistuvat yhteistyössä Yhdysvalloissa käynnissä olevaan Strategic Highway Research Program (SHRP) tutkimusohjelman Long-Term Pavement Performance (LTPP) projektiin. Yhteistoiminta SHRP:n ja Pohjoismaiden välillä tapahtuu tiedon siirron kautta SHRP:n toimistossa Yhdysvalloissa työskentelevän pohjoismaisen edustajan välityksellä sekä osallistumalla suoraan tutkimustoimintaan.

Pohjoismaiden LTPP-tutkimuksen tavoitteena on paikallisiin olosuhteisiin soveltuvien tien rakenteellisten kestoikämallien kehittäminen. Tutkimuksessa hyödynnetään myös Yhdysvalloista saatavia tuloksia, joiden hyvyttä ja käyttökelpoisuutta voidaan testata riippumattomalla pohjoismaisella aineistolla. Tämä on mahdollista, koska koeteiden valinta ja tiedonkeruu tehdään Pohjoismaissa noudattaen SHRP:n laatimia ohjeita.

Tutkimuksen tuloksena saatavia tien rakenteellisia kestoikämalleja käytetään hyväksi uusien tierakenteiden suunnittelussa ja olemassa olevien teiden rakenteellisen kestoiän arvioinnissa. Nykyistä tarkemmat ja paremmat mallit, joiden perusteella lasketaan taloudellisuustarkasteluun liittyvät vaihtoehtoisten tierakenteiden kestoiät, mahdollistavat suuretkin taloudelliset säästöt.

Tielaitoksen puolesta tutkimusta ovat valvoneet ja ohjanneet apulaisjohtaja Aarno Valkeisenmäki ja ylitarkastaja Reijo Orama geokeskuksesta. Tutkimusraportista ovat Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa vastanneet tekn.lis. Heikki Jämsä, tutk.ins. Harri Spoof, tutk.ins. Seppo Koivisto ja tekn.yo. Antti Ruotoistenmäki. Kenttämittaukset on tehnyt tutkimusavustajat Juhani Idman, Esa Vänskä, Kimmo Lyra sekä Tapio Jousinen.

Sisältö	Sivu
1 JOHDANTO	7
2 KOETIET	8
3 LIIKENNEMÄÄRÄ	11
4 RAKENNETIEDOT	13
5 MATERIAALIMODUULIT	16
5.1 Yleistä	16
5.2 Modulus-ohjelman laskentaperiaatteet	16
5.3 Materiaalimoduulit	18
6 KANTAVUUS	22
7 VAURIOT	24
8 TASAISUUS	26
9 URASYVYYS	28
10 RAKENTEEN KÄYTTÄYTYMINEN	30
11 TIERAKENTEEN VAURIOITUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	33
11.1 Muuttujien valinta	33
11.2 Muuttujien kuvaukset	33
11.3 Vaurioitumista selittävät tekijät	34
12 JOHTOPÄÄTÖKSET	41
13 KIRJALLISUUSLUETTELO	42
14 LIITTEET	43

## 1 JOHDANTO

Teiden rakenteelliseen vaurioitumiseen vaikuttavat liikenteestä ja ilmastosta aiheutuvat rasitustekijät sekä tien rakenteelliset ominaisuudet (materiaalit, rakennepaksuudet, pohjamaa). Näiden tekijöiden tunteminen on perusedellytyksenä tierakenteen käyttäytymisen hallitsemiselle ja vaurioitumismallien laadinnalle.

Vaurioitumismallien laadintaan vaikuttaa oleellisesti myös muuttujien vaihteluvälit, jotka on pyritty ottamaan huomioon jo etukäteen valitsemalla SHRP-kohteet tilastollisen koesuunnittelun periaatteita soveltaen.

Kestoiikään vaikuttavat tekijät on arvioitu SHRP asiantuntijoiden toimesta, ja ne on esitetty kirjallisuusviitteessä 1. Lähtökohtana on, että kultakin koetietä määritetään vaurioitumiseen keskeisesti vaikuttavat tekijät, jotka ovat potentiaalisia vaurioitumista selittäviä muuttujia. Seuraavassa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin koetieaineistoa sekä koeteiltä kerättyjä tietoja.



## 2 KOETIET

Suomen SHRP-koetiet käsittävät sekä AB + kant. (asfalttibetonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-1) että 2AB + kant. (uudelleenpäällystetty asfalttibetonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-6) rakenteet. Rakenteiden määrittelyssä on otettu huomioon vaiherakentaminen siten, että yhdeksi päällystekerraksi lasketaan lyhyen ajan sisällä peräkkäin (esim. 2-3 vuoden välein) tehdyt päällysteet edellyttäen, että ensimmäinen päällystekerros ei ole vaurioitunut ennen uudelleenpäällystystä.

Koeteiden valinnassa on hyödynnetty tilastollisen koesuunnittelun periaatteita. Tämän tarkoituksena on ohjata kohteiden valintaa siten, että olemassa olevat riippuvuudet tien vaurioitumisen ja niitä selittävien muuttujien välillä löydetään mahdollisimman suurella todennäköisyydellä.

Tutkittavien rakennetyyppien koematriisit perustuvat SHRP:n laatimiin otoskaavioihin, joita on muokattu Suomen/Pohjoismaiden olosuhteita vastaaviksi /1/. Koematriisit on esitetty kuvissa 1 (AB + kant.) ja 2 (2AB + kant.).

Kohteiden valintaan liittyvinä päämuuttujina (merkittävät tierakenteen kestävyyyteen vaikuttavat tekijät) ovat ilmastoalue, pohjamaa, liikennemäärä, rakenteen kantavuus sekä päällysteen paksuus. Muuttujien luokitteluarvot ovat seuraavat:

Ilmastoalue: Etelä (rannikkoalue) / Pohjoinen (muu Suomi)

Pohjamaa: Kitka / Koheesio

Liikennemäärä: AB + kant. 2400 ajon./vrk  
2AB + kant. 3000 ajon./vrk

Rakenteen  
kantavuus: 390 MPa

Päällysteen  
paksuus: AB + kant. 76 mm  
2AB + kant. 116 mm

GPS - 1									
ILMASTOALUE		POHJOINEN				ETELÄ			
POHJAMAAN TYYPPI		KITKA		KOHEESIO		KITKA		KOHEESIO	
LIIKENNEMÄÄRÄ		A	K	A	K	A	K	A	K
RAKENTEEN KANTAVUUS	PÄÄLLYSTEEN PAKSUUS								
KORKEA	OHUT			1	1				
	KESKINKERTAINEN		2			2	1		
ALHAINEN	OHUT	1		1	1	1		1	
	KESKINKERTAINEN	1		1				1	1
RAJA-ARVOT:		KANTAVUUS:		390 MPa					
		AB-PAKSUUS:		75 mm					
		POHJAMAAN MOD:		100 MPa					
		KVL:		2400					

Kuva 1. AB + kant. (GPS-1) koekaavio ja valitut kohteet.

GPS - 6									
ILMASTOALUE		POHJOINEN				ETELÄ			
POHJAMAAN TYYPPI		KITKA		KOHEESIO		KITKA		KOHEESIO	
LIIKENNEMÄÄRÄ		A	K	A	K	A	K	A	K
RAKENTEEN KANTAVUUS	PÄÄLLYSTEEN PAKSUUS								
KORKEA	OHUT	2					2		1
	KESKINKERTAINEN		1	2	1			2	
ALHAINEN	OHUT	4		3	1	1		1	
	KESKINKERTAINEN	1		2	2			2	
RAJA-ARVOT:		KANTAVUUS:		430 MPa					
		AB-PAKSUUS:		115 mm					
		POHJAMAAN MOD:		100 MPa					
		KVL:		2900					

Kuva 2. 2AB + kant. (GPS-6) koekaavio ja valitut kohteet.

Valitut koetiet on merkitty koematriiseihin rasterilla. Kussakin sellissä esiintyvä numero ilmoittaa kohteiden lukumäärän ko. muuttujakombinaatiolla. AB + kant. (GPS-1) kohteita on yhteensä 18 kappaletta (näistä kaksi on uudelleen-päällystetty ollen 2AB + kant. kohteita) ja 2AB + kant. (GPS-6) kohteita 28 kappaletta, ja niiden yksityiskohtainen osoitetietokuvaus on esitetty liitteessä 1.

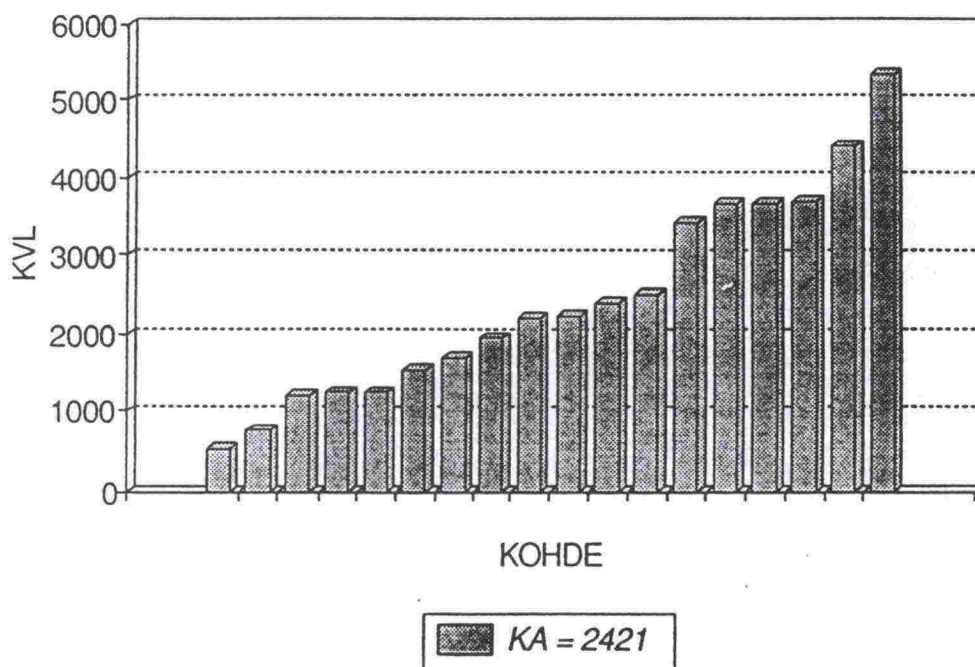
Koeteiden valinnan osalta voidaan todeta, että kohteet jakautuvat suhteellisen hyvin koematriisien eri selleihin. Puuttuvia muuttujakombinaatiota ovat AB + kant. (GPS-1) rakenteilla sellaiset Etelä-Suomen kitka- ja koheesiopohjamailla olevat yhdistelmät, joissa rakenteen kantavuus on korkea ( $> 390$  MPa) ja päällysteen paksuus ohut ( $< 75$  mm).

2AB + kant. (GPS-6) rakenteista puuttuu myös korkean kantavuuden ja ohuen päällystepaksuuden omaavat kohteet. Puuttuvien muuttujayhdistelmien osalta aineistoa pyritään täydentämään vuonna 1993.

### 3 LIIKENNEMÄÄRÄ

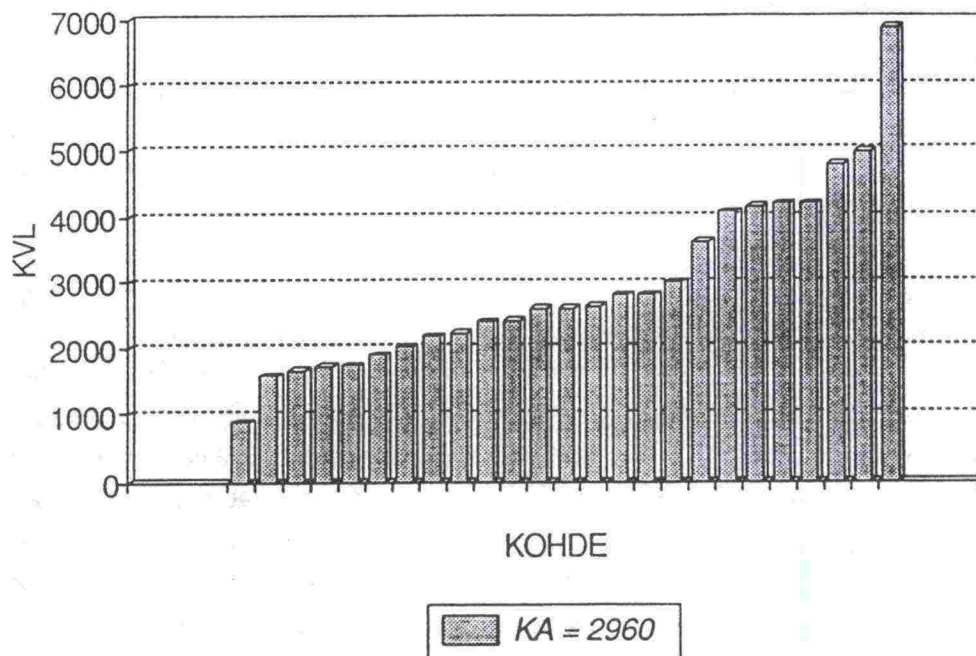
Koeteiden tierekisterin mukaiset liikennemääräjakaumat on esitetty kuvissa 3 (AB + kant.) ja 4 (2AB + kant.). AB + kant. kohteiden liikennemäärä on välillä 500 - 5200 (keskiarvo 2421) ja 2AB + kant. kohteiden välillä 1000 - 7000 (keskiarvo 2960) ajon./vrk.

Suomessa kohteiden valintaa säätelee suurten liikennemäärien osalta nastarengaskulutus. Esimerkiksi vilkkaasti liikennöityjä moottoriteitä ei voida valita koetieaineistoon. Syynä tähän on se, että vilkkaasti liikennöitävät tiet joudutaan käytännössä lähes aina päällystämään muun kuin tien rakenteellisen heikkouden takia. Tällöin tutkimuksen kannalta on hyödytöntä valita tutkimusaineistoksi sellaisia kohteita, joissa rakenteellisia vaurioita ei koskaan esiinny. Mikäli tutkimuskohteissa esiintyy päällystämistarvetta urautumisen takia, tulee SHRP:n ohjeiden mukaan valita sellaisia ylläpitotoimenpiteitä, että tien rakenteellinen kestävyys ei muutu. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sallittavana toimenpiteenä on esim. urapaikkaus mutta ei uusi päällyste.



Kuva 3. AB + kant. (GPS-1) kohteiden tierekisteritietojen mukainen liikennemääräjakauma.





Kuva 4. 2AB + kant. (GPS-6) kohteiden tierekisteritietojen mukainen liikennemääräjakauma.

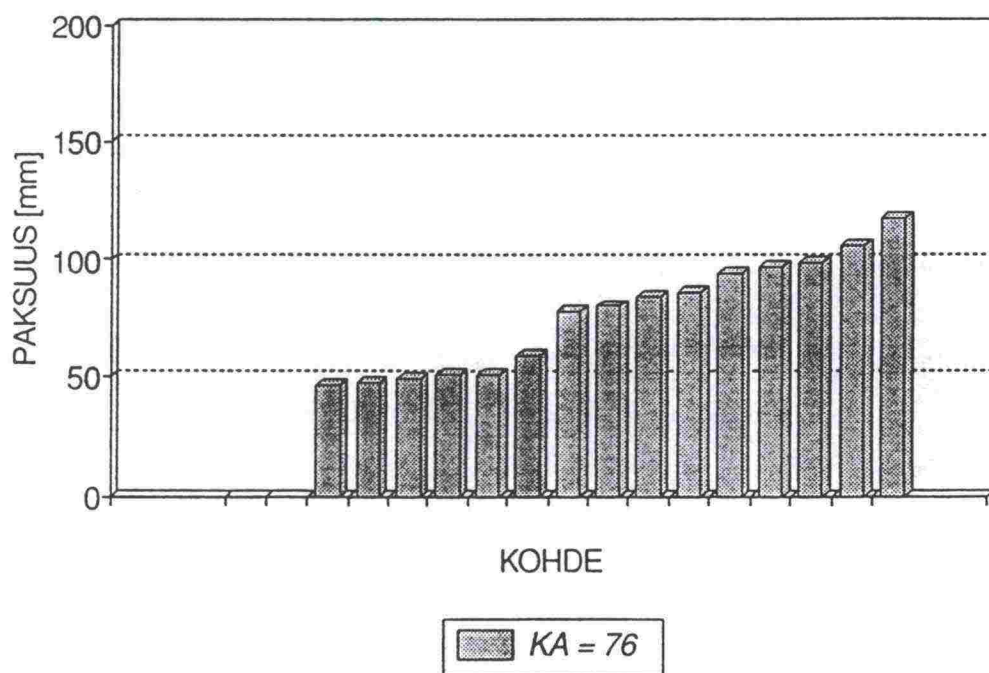
## 4 RAKENNETIEDOT

Koeteiden rakennetiedot on määritetty koeosuuden toisesta päästä valitulta koealueelta, jonka koko on 1.0 m x 1.5 m. SHRP:n ohjeiden mukaan koealueet tulisi tehdä rakenteen kumpaankin päähän, mutta tästä luovuttiin kustannussyistä. Rakenteen homogeenisuutta on mahdollista arvioida kantavuusmitaustulosten perusteella (ks. kohta 6).

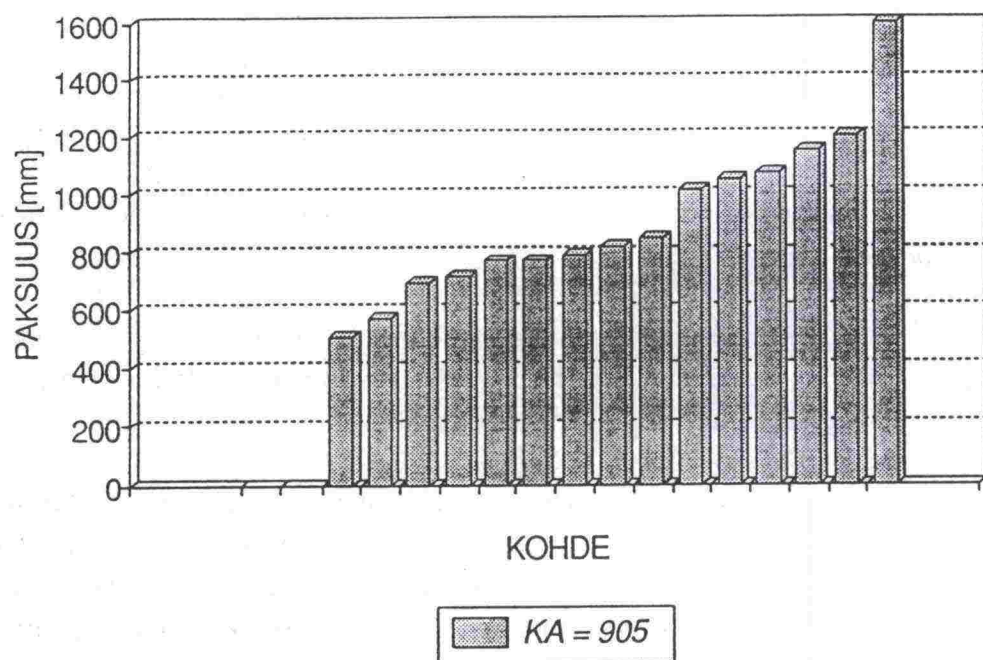
Sidottujen kerrosten paksuudet on laskettu koealueelta otettujen 9 porakappaleen keskiarvona. Sitomattomien kerrosten paksuudet mitattiin avatusta poikkileikkauksesta kunkin rakennekerroksen osalta erikseen.

AB + kant. (GPS-1) rakenteiden kerrospaksuusjakaumat sidottujen ja sitomattomien kerrosten osalta on esitetty kuvissa 5 ja 6. Päällystepaksuudet vaihtelevat 50 - 120 mm:n välillä keskiarvon ollessa 76 mm. Sitomattomien kerrosten paksuudet vaihtelevat 500 - 1600 mm:n välillä keskiarvon ollessa 905 mm.

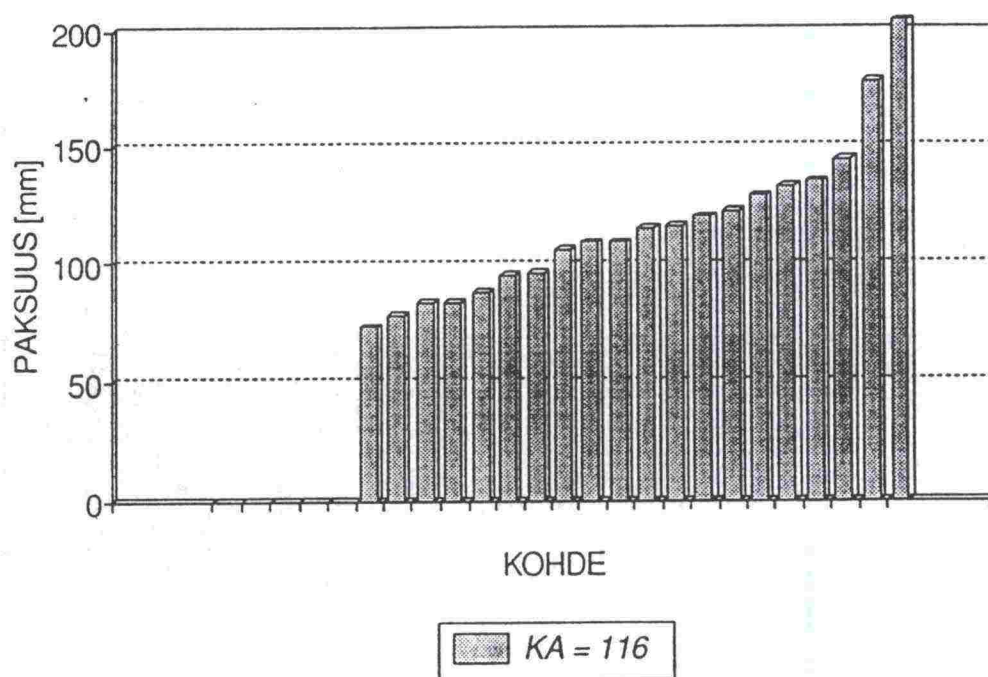
2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden kerrospaksuusjakaumat on esitetty kuvissa 7 ja 8. Kohteiden päällystepaksuudet ovat 65 - 200 mm keskiarvon ollessa 116 mm. Sitomattomien kerrosten kokonaispaksuudet ovat 580 - 1405 mm keskiarvon ollessa 913 mm.



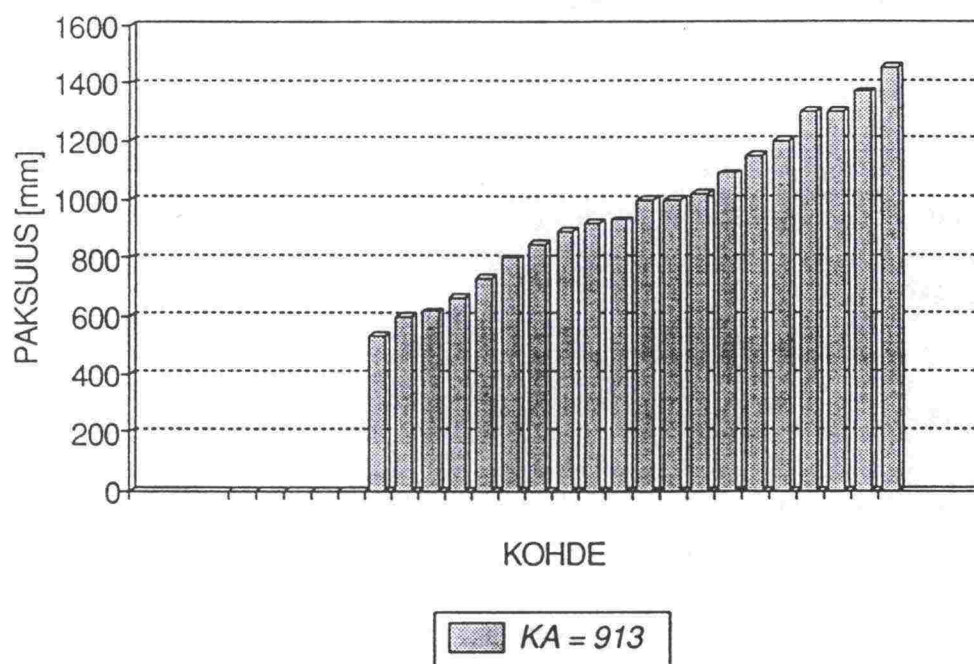
Kuva 5. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden päällystepaksuusjakaumat.



Kuva 6. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden sitomattomien kerrosten paksuusjakaumat.



Kuva 7. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden päällystepaksuusjakaumat.



Kuva 8. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden sitomattomien kerrosten paksuusjakaumat.



## 5 MATERIAALIMODUULIT

### 5.1 Yleistä

Moduuleilla kuvataan eri materiaalien kykyä vastustaa rasituksista aiheutuvia muodonmuutoksia. Materiaalimoduuleilla on merkittävä vaikutus tierakenteen käyttäytymiseen, minkä vuoksi ne ovat peruslähtötietona rakenteiden vaurioitumisen syitä selvitettäessä.

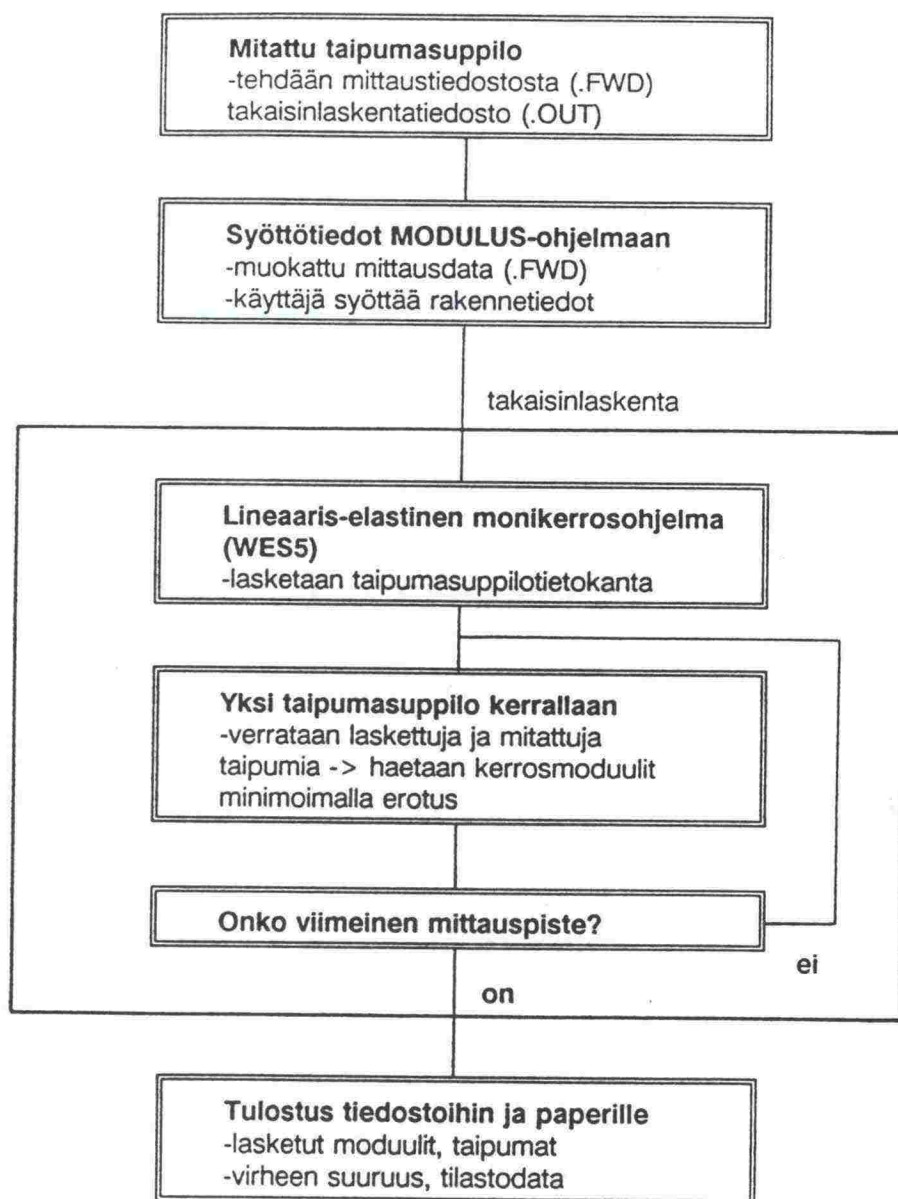
Materiaalimoduulit voidaan määrittää joko laboratoriossa tai kentällä pudotuspainolaitetulosten perusteella. Seuraavassa käsitellään koeteiden materiaalimoduuleja, jotka on saatu pudotuspainolaitteen tuottamien taipumasuppilotietojen perusteella käyttäen Modulus-takaisinlaskentaohjelmaa. Modulus on sama ohjelma, jolla SHRP analysoi omat koetiensä.

### 5.2 Modulus-ohjelman laskentaperiaatteet

Modulus-takaisinlaskentaohjelman toimintakaavio on esitetty kuvassa 9. Ohjelman toiminta on kaksiosainen siten, että ensin lasketaan (simuloidaan) eri kerroksille annettujen materiaalimoduulien ylä- ja alarajojen perusteella lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (WES5) taipumasuppilotietokanta. Tämän jälkeen verrataan kutakin pudotuspainolaitteella mitattua taipumasuppilola laskettuun (simuloituun) taipumasuppilotietokantaan, minkä jälkeen mitatun ja lasketun taipuman välisen erotuksen neliö minimoidaan kunkin anturin kohdalla.

Pudotuspainolaitteella mitataan yhdestä mittauspisteestä yleensä vähintään kolmen pudotuksen aiheuttamat taipumasuppilot, joita käsitellään takaisinlaskentaohjelmassa yksi kerrallaan. Mittaustiedostosta (.FWD) muokataan muunnosohjelmalla ensin takaisinlaskentaohjelman käyttämä tiedosto (.OUT), johon otetaan yksi mittaus kustakin pisteestä. Modulus lukee tämän ns. formatoidun tiedoston levyltä.

Käyttäjä antaa valikossa lähtötietoina ohjelmalle mm. kerrospaksuudet, ylä- ja alarajat eri kerrosten materiaalimoduulien arvoille, lähtöarvon pohjamaan moduulille, Poisson-luvun kullekin materiaalille sekä kuormituslevyn säteen ja taipumanmittausantureiden etäisyydet kuormituslevyn keskipisteestä. Myös kovan pohjan (esim. kallio) sijainti voidaan antaa lähtötietona tai Modulus-ohjelma laskee sen automaattisesti mitattujen taipumatietojen perusteella.



Kuva 9. Modulus-takaisinlaskentaohjelmiston toimintakaavio.

Ohjelma tulostaa joko tiedostoihin tai paperille mm. kunkin rakennekerroksen ja pohjamaan materiaalimoduulin, mitatut ja lasketut taipumat sekä näiden välisen virheen suuruuden sekä tilastotiedot koeosuudelta (keskiarvo, otoskeskihajonta, variaatiokerroin). Modulus-ohjelman tulostusesimerkki on esitetty liitteessä 2.

Takaisinlaskennassa materiaalimoduulit etsitään minimoimalla laskettujen ja mitattujen taipumien välisen prosentuaalisen erotuksen neliö. Kauimmaisten anturien mittaamat taipumat ovat absoluuttisesti pienempiä kuin läheltä kuormituslevyä mitatut taipumat, joten virheprosentti saattaa kasvaa suureksi. Jos virhe on suuri ( $> 2\%$ /anturi), tulee laskettujen materiaalimoduulien suuruusluokka tarkistaa.

### 5.3 Materiaalimoduulit

Materiaalimoduulit on laskettu Modulus-ohjelmalla siten, että rakenne on määritelty kolmikerrosratkaisuksi, joka koostuu päällysteestä, sitomattomista kerroksista ja pohjamaasta. Päällysteen laskettu moduuliarvo on korjattu lämpötilaan  $+20^{\circ}\text{C}$  AASHO-mitoitusmenetelmässä esitetyn korjauskäyrän perusteella.

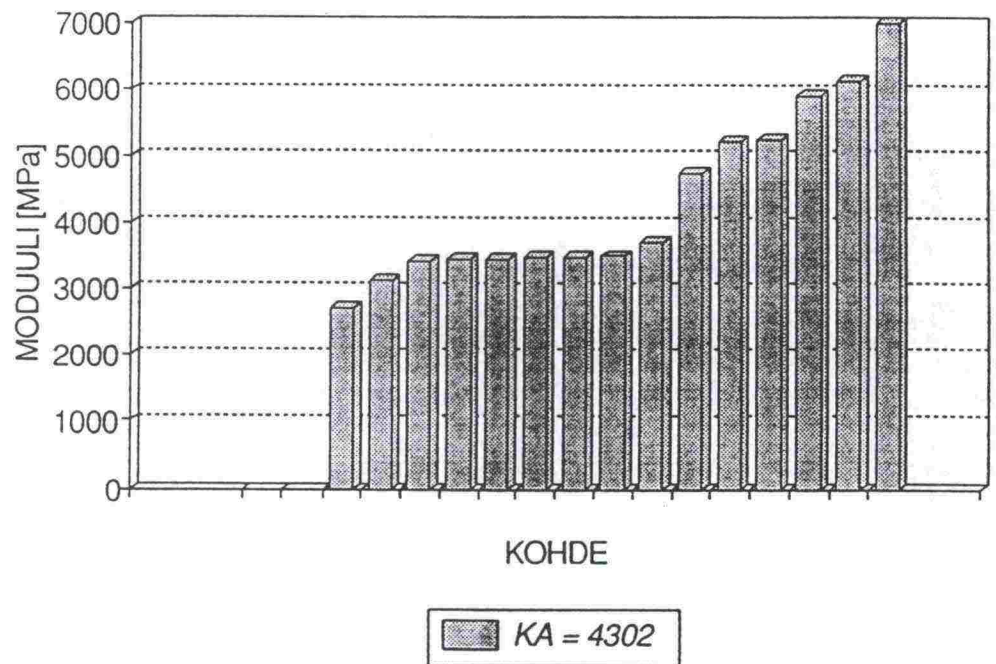
Moduuliarvot on määritetty kustakin mittauspisteestä erikseen, joita on kullakin koetiellä 42 kappaletta. Liitteessä 3 on esitetty esimerkki lasketuista moduuliarvoista yhden koetien pituusleikkauksen osalta.

Sidottujen kerrosten moduuliarvojen jakaumat on esitetty kuvissa 10 (AB + kant.) ja 11 (2AB + kant.). Kuvista havaitaan moduuliarvojen vaihtelevan välillä 1600 - 7000 MPa, joita voidaan pitää nykytietämyksen ja -kokemuksen mukaisina. Moduuliarvojen tarkastelussa tulee huomata, että päällysteessä esiintyvän halkeaman kohdalta laskettu moduuliarvo on aina alhaisempi kuin ehjän päällysteen moduuliarvo.

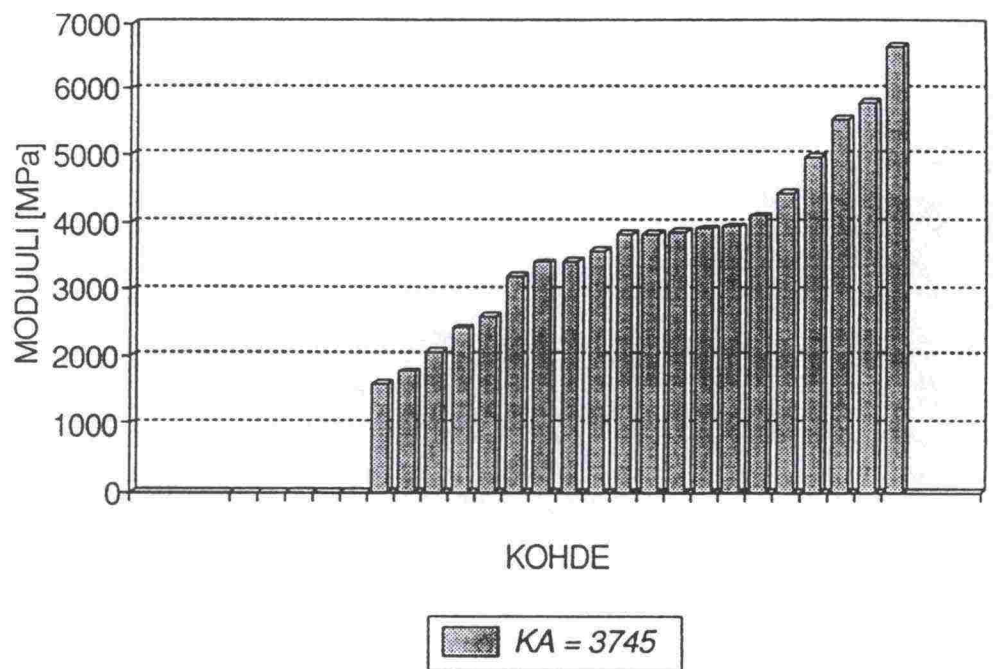
Sitomattomien kerrosten materiaalimoduulit on esitetty kuvissa 12 (AB + kant.) ja 13 (2AB + kant.). Moduuliarvot vaihtelevat 150 MPa:n ja 500 MPa:n välillä. Arvot ovat nykyisin mitoituksessa käytettävien moduuliarvojen suuruusluokkaa, joten tuloksia voidaan pitää järkevinä.

Pohjamaiden materiaalimoduulit on esitetty kuvissa 14 (AB + kant.) ja 15 (2AB + kant.). Moduuliarvot vaihtelevat 40 - 160 MPa:n välillä, joten tulosten vaihteluväli on hyvä. Moduulien arvoja tarkasteltaessa on muistettava, että ne ovat suurempia kuin Suomen mitoitusmenetelmässä käytetyt arvot. Tämä johtuu siitä, että moduuliarvot perustuvat pudotuspainolaitteen tuloksiin, jolla saadaan suurempia arvoja kuin levykuormituskokeella. Lisäksi lasketut moduuliarvot eivät ole kevätkantavuusarvoja, joita käytetään Suomessa mitoituksen lähtötietona. Mittaukset on tehty pääasiassa kesällä.



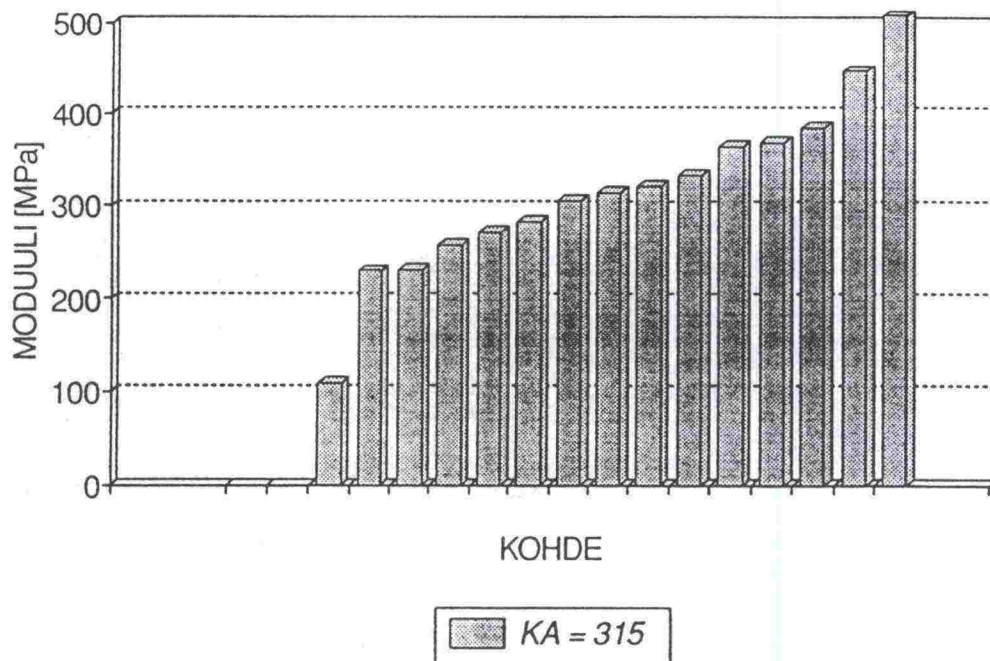


Kuva 10. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden päällysteen moduulijakaumat.

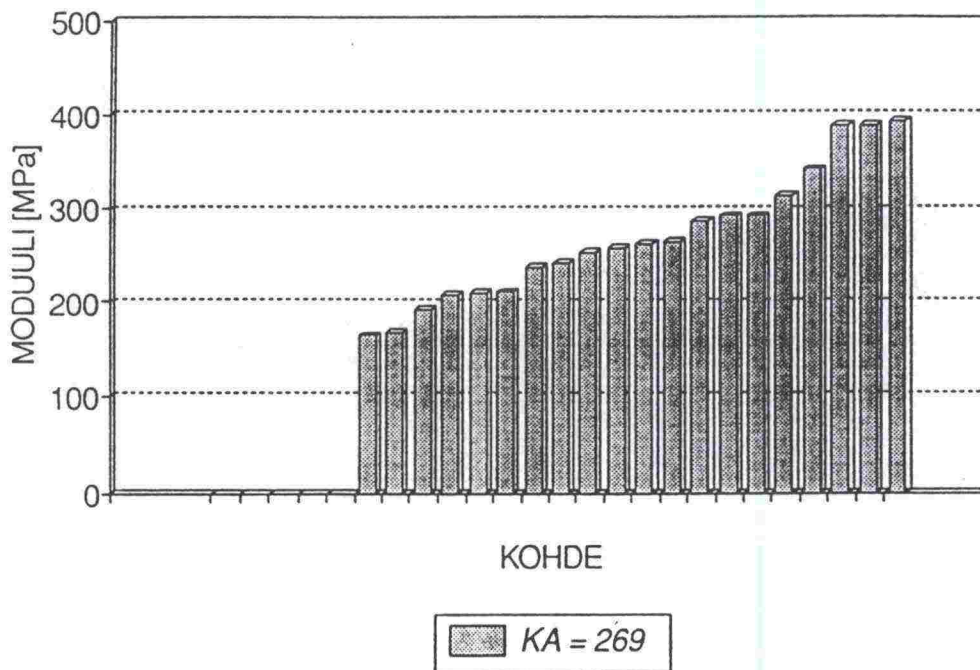


Kuva 11. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden päällysteen moduulijakaumat.

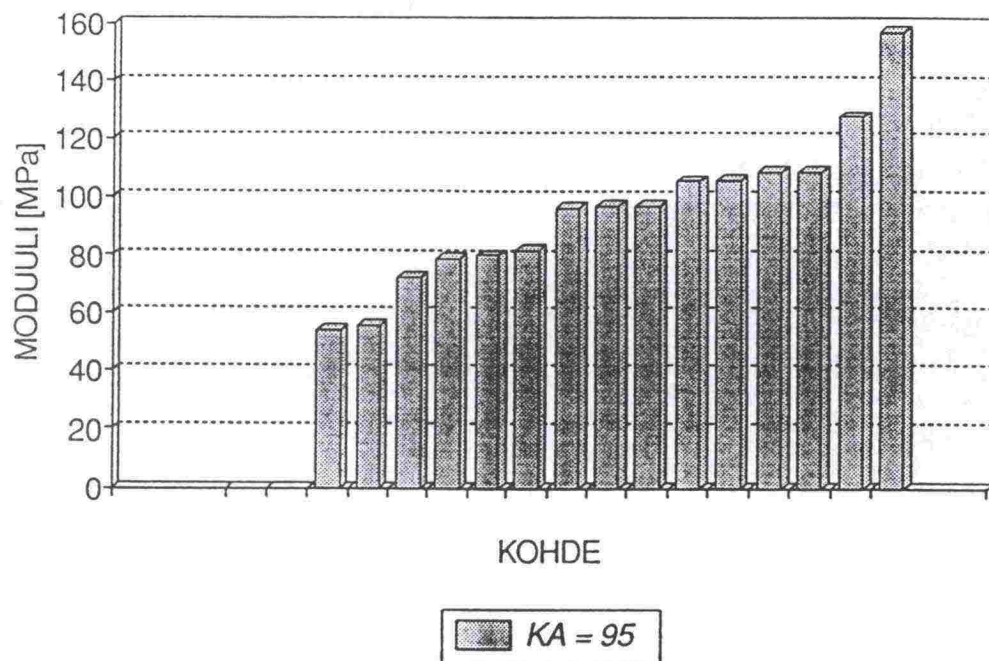




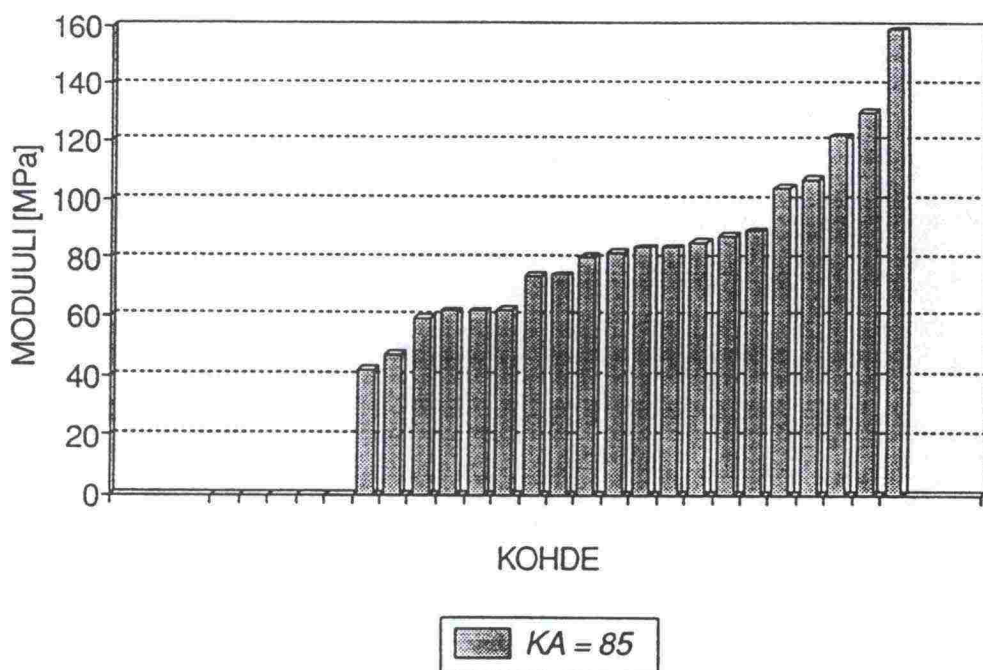
Kuva 12. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden sitomattomien kerrosten moduulijakaumat.



Kuva 13. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden sitomattomien kerrosten moduulijakaumat.



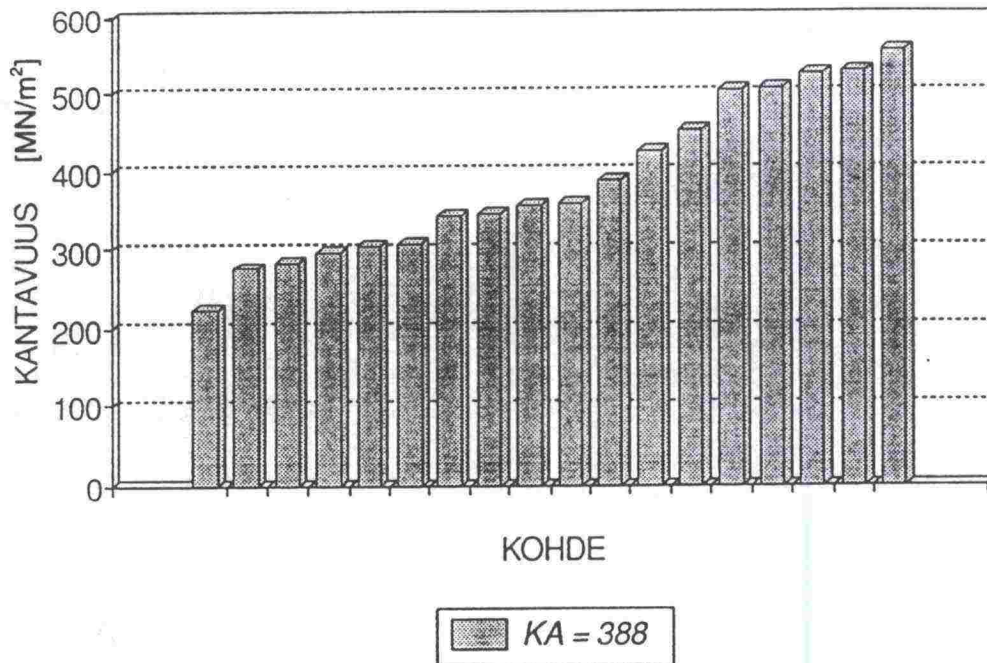
Kuva 14. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden pohjamaiden moduulija-  
kaumat.



Kuva 15. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden pohjamaiden moduulija-  
kaumat.

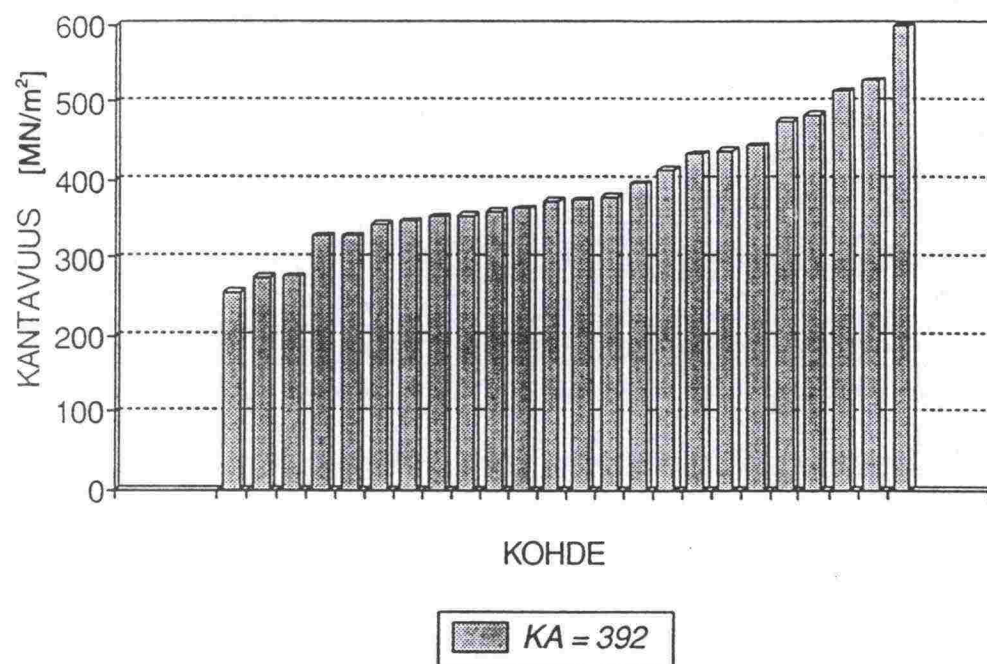
## 6 KANTAVUUS

Koeteiden kantavuusjakaumat on esitetty kuvissa 16 (AB + kant.) ja 17 (2AB + kant.). Kantavuudet vaihtelevat  $210 \text{ MN/m}^2$ :n ja  $600 \text{ MN/m}^2$ :n välillä keskiarvon ollessa kummallakin tiellä noin  $390 \text{ MN/m}^2$ . Tämä vaihtelualue kattaa hyvin tierakenteiden suunnittelunormien tavoitekantavuusarvot, jotka ovat välillä  $160\text{--}420 \text{ MN/m}^2$ .



Kuva 16. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden kantavuusjakaumat.





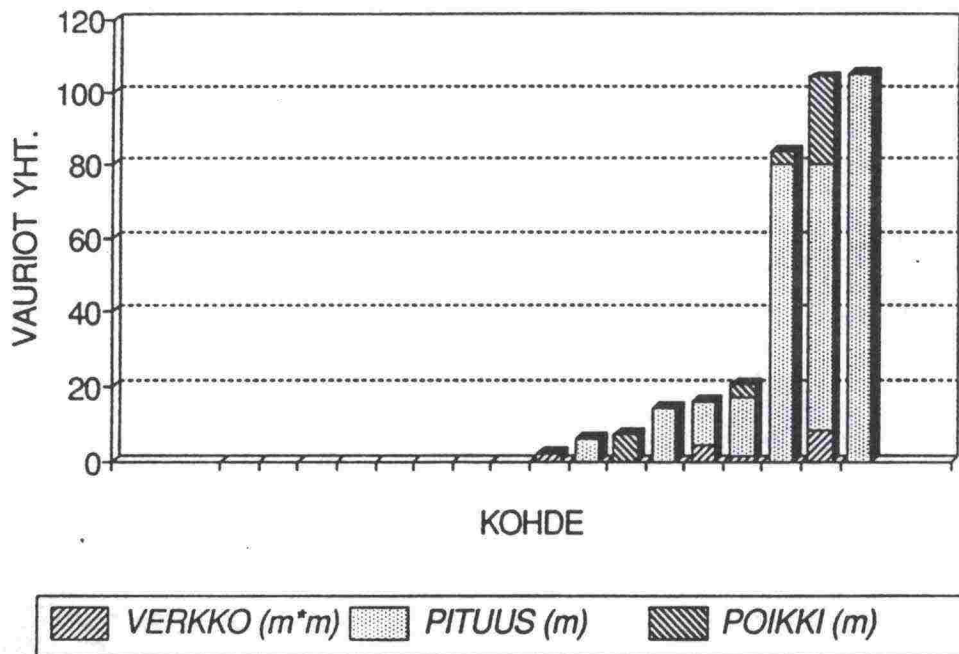
Kuva 17. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden kantavuusjakaumat.



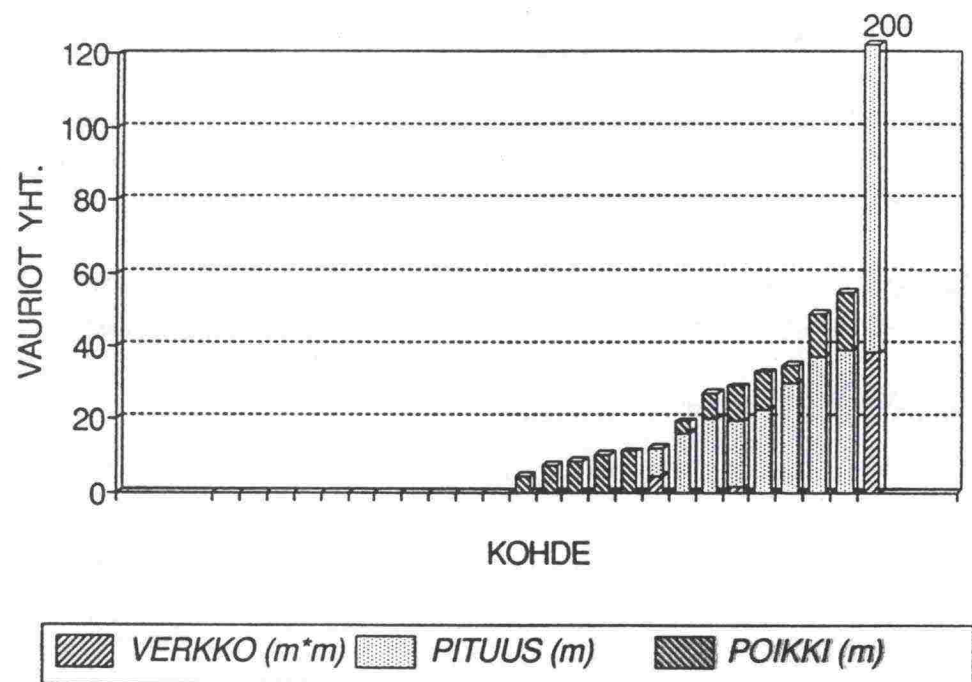
## 7 VAURIOT

Koeteiltä on inventoitu vaurioiden määrä, vaurioitumisaste (3 luokkaa) sekä piirretty vauriokartat. Yhteenveto vaurioiden yhteissummasta on esitetty kuvissa 18 (AB + kant.) ja 19 (2AB + kant.).

Osalla teistä ei esiinny tällä hetkellä vaurioita lainkaan. Vaurioituneissa kohteissa pääasiallisena vauriotyyppinä ovat pituushalkeamat. Myös verkko- ja poikkihalkeamia esiintyy jonkin verran.



Kuva 18. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden vauriot (yhteissumma).

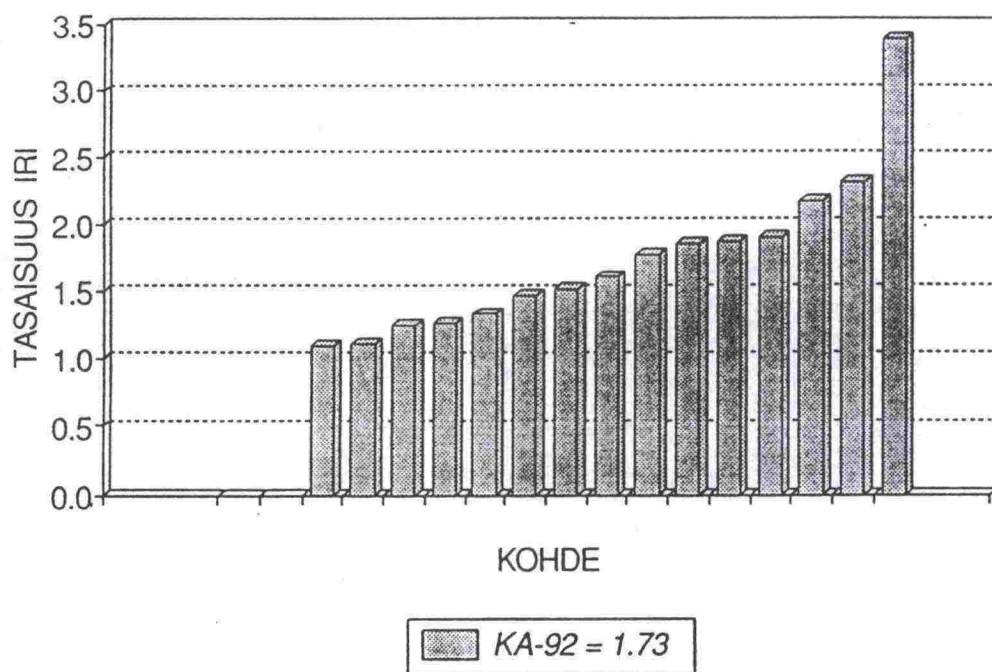


Kuva 19. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden vauriot (yhteissumma).

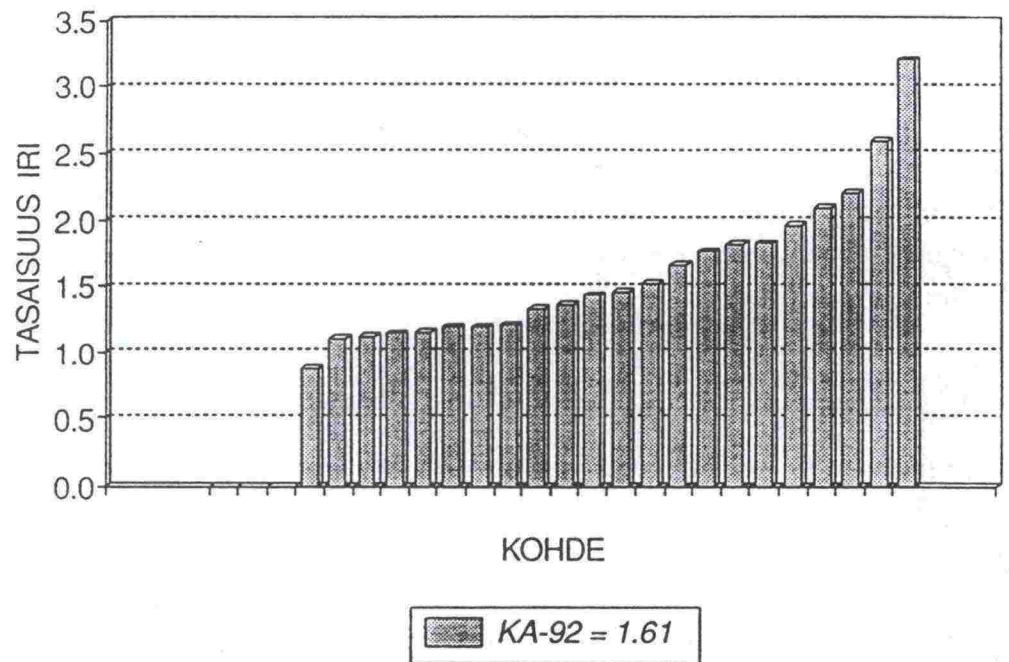
## 8 TASAISUUS

Koeteiden tasaisuus mitattiin VTT:n palvelutasoautolla (PTM). Tasaisuutta kuvataan IRI-arvolla, jonka yksikkö on mm/m. IRI-jakaumat on esitetty kuvissa 20 (AB + kant.) ja 21 (2AB + kant.).

Tuloksista havaitaan tasaisuuden vaihtelevan 0.9 - 3.4 välillä keskiarvojen ollessa 1.61 (AB + kant.) ja 1.73 (2AB + kant.). Tielaitoksen kuntoluokituksen mukaan tiet ovat kuntoluokkavälillä erittäin hyvä (IRI < 1.5 mm/m) ja tyydyttävä (2.5-3.5 mm/m) nopeusrajoituksella 80 km/h.



Kuva 20. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden IRI-jakaumat (mm/m).

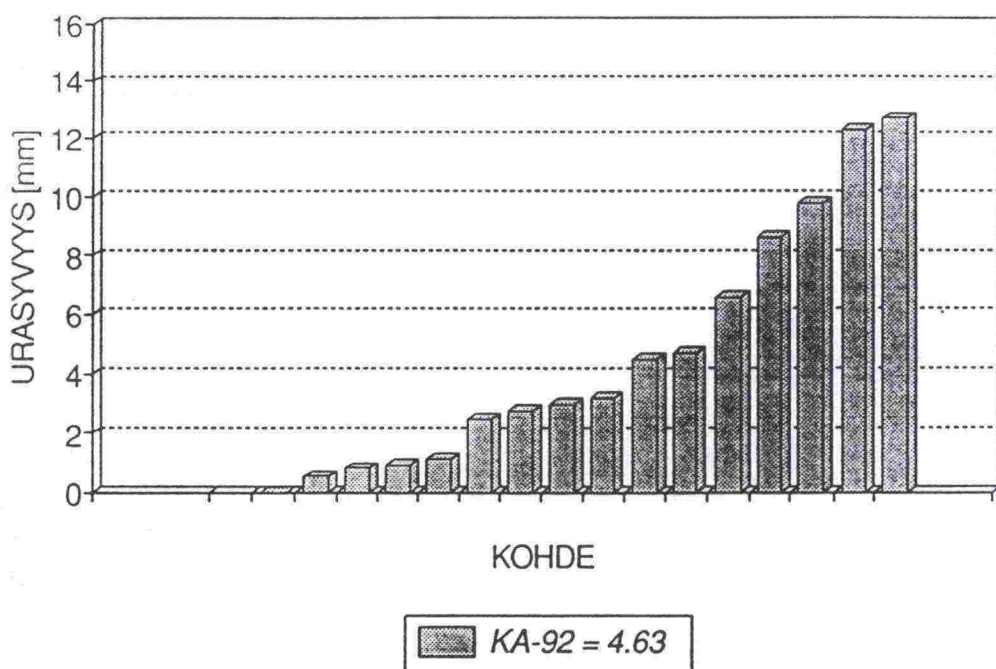


Kuva 21. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden IRI-jakaumat (mm/m).

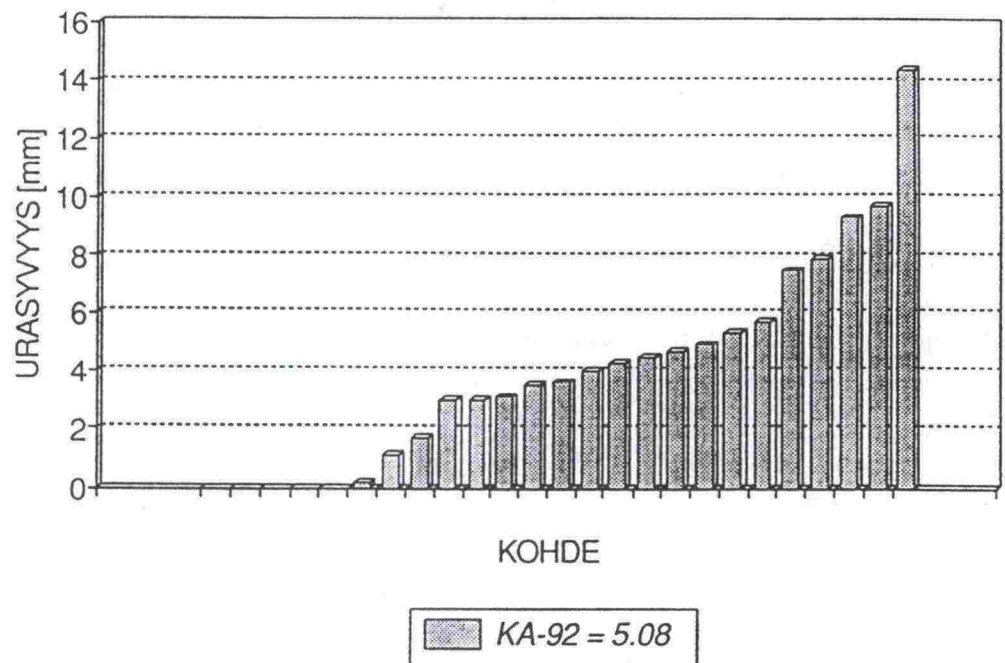


## 9 URASYVYYS

Urasyvyydet mitattiin VTT:n PTM-autolla. Tulokset on esitetty kuvissa 22 (AB + kant.) ja 23 (2AB + kant.). Tuloksista havaitaan suurimpien urasyvyyksien olevan 14 mm. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tiepiirien ja tiemestareiden kanssa on sovittava mahdollisista SHRP:n mukaisista toimenpiteistä, joilla urat tullaan korjaamaan siten, että koetietä ei menetetä (rakenne ei muutu).



Kuva 22. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden urasyvyysjakauma (mm).



Kuva 23. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden urasyvyysjakauma (mm).

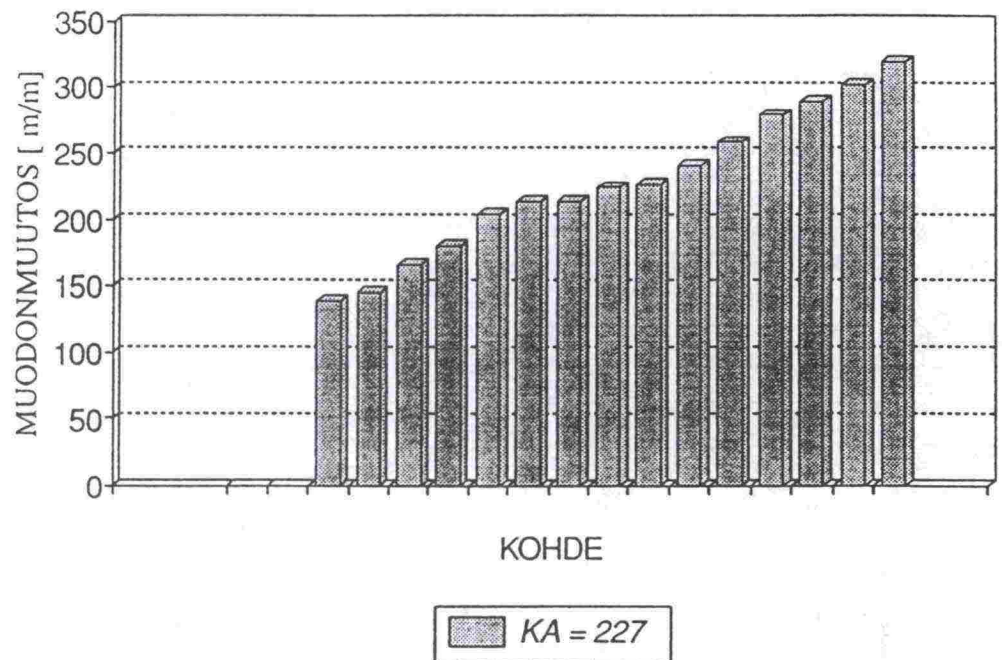
## 10 RAKENTEEN KÄYTTÄYTYMINEN

Tierakenteiden analyyttisissä mitoitusmenetelmissä rakenteen kestoikä (kuormituskertaluku) arvioidaan päällysteen alareunan vetomuodonmuutoksen (tai pohjamaan pystysuoran muodonmuutoksen) suuruuden perusteella.

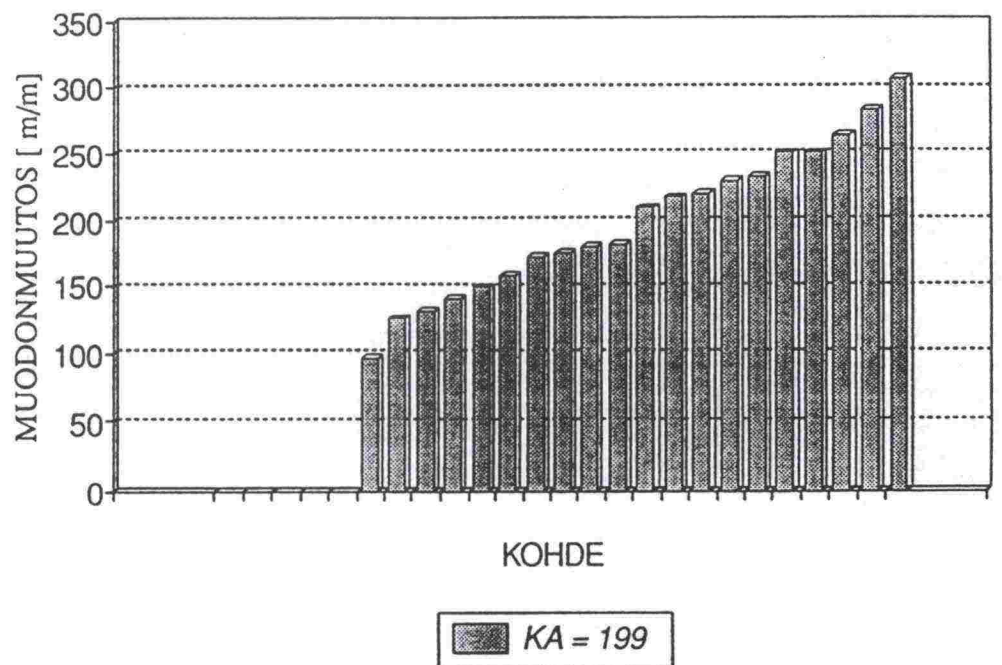
Kullekin SHRP-koetiele laskettiin vetomuodonmuutokset BISAR-monikerrosohjelmalla. Lähtötietoina annettiin rakennekerrosten paksuudet, materiaali-moduulit, Poisson-luvut sekä kuormitustiedot. Kuormituksena käytettiin 8 tonnin akselipainoa, mikä on SHELLin mitoitusmenetelmän mukainen akselipaino.

Muodonmuutosten suuruudet on esitetty kuvissa 24 (AB + kant.) ja 25 (2AB + kant.). Tuloksista havaitaan muodonmuutosten olevan välillä 100 - 300 ( $\mu\text{m/m}$ ), mitä voidaan pitää hyvänä vaihteluvälinä.

Muodonmuutosten suuruuden ja kuormituskertaluvun välistä yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 26, jossa on esitetty SHELLin mitoitusmenetelmän mukaiset väsymissuorat /3/. Kuvasta voidaan todeta, että ko. kriteerien perusteella voidaan olettaa rakenteiden kestävän  $10^5$  -  $10^8$  kuormituskertaa (8 tonnin akselipaino) käytettäessä päällysteen jäykkyysmoduulin arvoa 4000 MPa. Kun 8 tonnin akselipainolla lasketut kuormituskertaluvut muutetaan neljännen potenssin säännön perusteella 10 tonnin akselipainoja vastaaviksi arvoiksi, voidaan todeta kuormituskertojen olevan suhteellisen lähellä Suomen suunnittelunormien mukaista tasoa. Näin ollen laskettuja arvoja voidaan pitää realistisina.

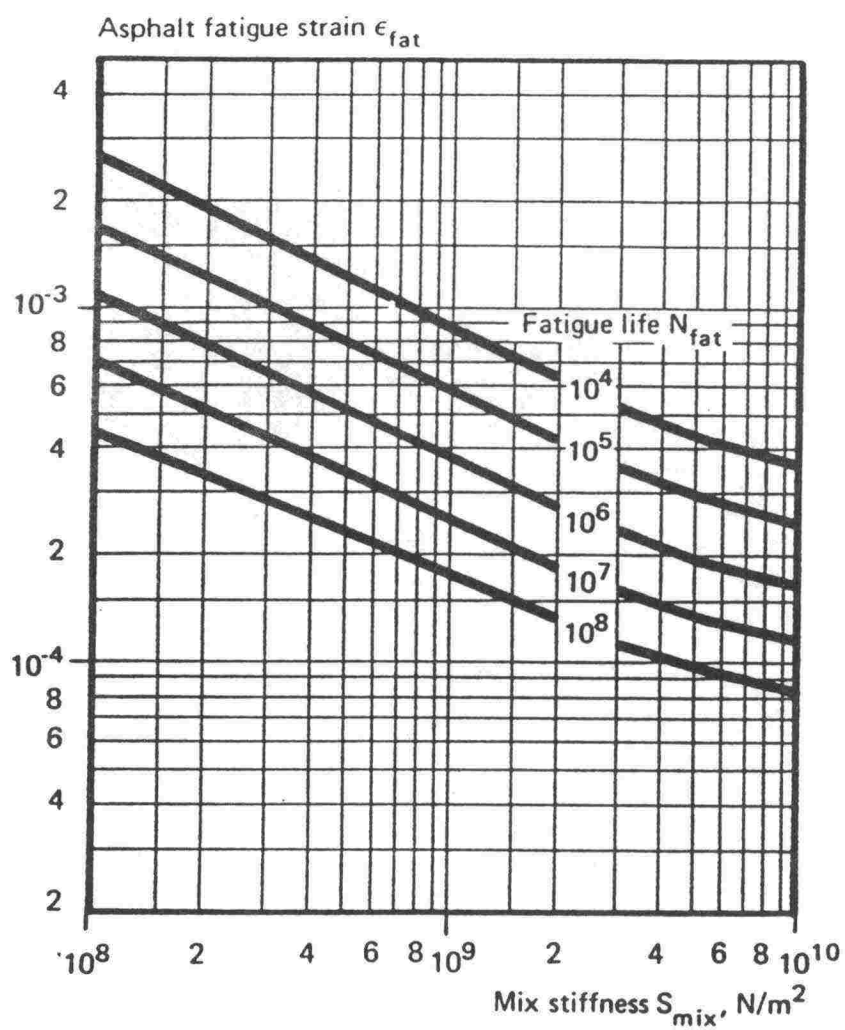


Kuva 24. AB + kant. (GPS-1) rakenteiden muodonmuutosjakauma (mm).



Kuva 25. 2AB + kant. (GPS-6) rakenteiden muodonmuutosjakauma (mm).





Kuva 26. SHELL-mitoitusmenetelmän väsymissuorat.

## 11 TIERAKENTEEN VAURIOITUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

### 11.1 Muuttujien valinta

Koeteiltä on määritetty kaikki ne perustekijät, jotka vaikuttavat tien rakenteelliseen vaurioitumiseen. Näitä ovat mm.:

- rakennekerrosten paksuudet
- rakennekerrosten ja pohjamaan materiaalimoduulit
- ikä
- kuormituskertaluku
- päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos
- pohjamaan pinnan pystysuora muodonmuutos.

Lisäksi vaurioitumiseen vaikuttavat ilmastolliset tekijät (pakkasmäärä, lämpötila jne.). Näitä tietoja ei ole kuitenkaan vielä tällä hetkellä käytettävissä, vaan ne saadaan analysoinnin myöhemmässä vaiheessa Ilmatieteen laitokselta. Ilmastovaikutukset tulevat epäsuorasti otettua huomioon ikätekijän kautta.

### 11.2 Muuttujien kuvaukset

Kunkin tietokannassa olevan muuttujan osalta määritettiin seuraavat kuvaukset:

- muuttujien jakaumat
- muuttujien muunnosten vaikutukset jakauman muotoon
- puuttuvat tiedot
- epätavalliset (poikkeavat) havaintopisteet.

Tarkastelun tuloksena havaittiin, että muuttujat ovat pääsääntöisesti normaali-jakautuneita. Ei-normaalajakautuneita muuttujia olivat kuormituskertaluku, muodonmuutokset sekä vauriomäärät. Nämä saatiin lähemmäksi normaalijakauman muotoa logaritmimuunnoksen avulla.

Kuvassa 27 on esitetty esimerkki logaritmimuunnoksen vaikutuksesta kumulatiivisen kuormituskertaluvun jakaumaan  $2AB + \text{kant. rakenteella}$ . Havaintopisteiden jakauman poikkeaman suuruutta normaalijakaumasta kuvataan Shapiro-Wilkin testisuureella  $W$ , joka on välillä 0.0 - 1.0. Mitä lähempänä  $W$  on arvoa 1.0, sitä lähempänä normaalijakaumaa testiaineisto on. Tilastollisen analyysin tuloksena saatiin kumulatiiviselle kuormituskertaluvulle alkuperäisten havaintopisteiden  $W$ -testisuureen arvoksi 0.79 ja logaritmimuunnoksen jälkeen  $W = 0.95$ . Näin ollen analyysissä käytetään muuttujalle logaritmimuotoa.

## VKKKL

Stem	Leaf	#
3	9	1
3	2	1
2		
2		
1	59	2
1	11122223333	11
0	5566666779	10
0	223	3
-----+-----+-----+-----+		
Multiply Stem.Leaf by 10**+6		

## LOG10(VKKL)

Stem	Leaf	#
64	09	2
62	8	1
60	234779922238	12
58	1576	4
56	015569	6
54	2	1
52	17	2
-----+-----+-----+-----+		
Multiply Stem.Leaf by 10**-1		

Kuva 27. Esimerkki logaritmissen muunnoksen vaikutuksesta kumulatiivisen kuormituskertaluvun (VKKKL) jakaumaan. Yläkuvassa alkuperäiset havaintopisteet, alakuvassa logaritminen muunnos.

### 11.3 Vaurioitumista selittävät tekijät

Vaurioitumista kuvaavaksi muuttujaksi valittiin koeosuudella esiintyvien verkkohalkeamien, pituushalkeamien ja poikkihalkeamien logaritminen yhteissumma (ks. kuvat 18 ja 19). Logaritminen muunnos kasvattaa W:n arvoa alkuperäiseen yhteissummaan verrattuna AB + kant. kohteilla 0.67:stä 0.90:een ja 2AB + kant. kohteilla 0.69:stä 0.88:aan. Näin ollen logaritmuunnoksen jälkeen summaindeksi on lähempänä normaalijakauman muotoa.

Vaurioitumiseen vaikuttavia tekijöitä tutkittiin kunkin muuttujan osalta erikseen sekä graafisesti että korrelaatioanalyysin perusteella. Logaritmistä vaurioiden yhteissummaa selittävät muuttujat on esitetty taulukossa 1 sekä AB + kant. ja



2AB + kant. rakenteille. Mukana on myös merkityksellisimmät ( $r > 0.60$ ) kahden muuttujan yhdysvaikutukset. Analyysissä on mukana vain ne kohteet, joissa on esiintynyt vaurioita (AB + kant. 11 kohdetta ja 2AB + kant. 13 kohdetta).

1AB + kant. rakenteiden vaurioitumista selittää merkittävästi päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen suuruus (logaritmimuunnos) korrelaatioker-toimen ollessa 0.89. Kuvassa 28 on esitetty summavaurion ja muodonmuu-toksen välinen yhteys. Myös päällysteen alareunan muodonmuutoksen ja kuormituskertaluvun yhteisvaikutuksella on selvä korrelaatio vaurioitumiseen ( $r = 0.73$ ). Tämä selittyy sillä, että tierakenne saattaa vaurioitua pienellä muodonmuutoksella, mikäli kuormituskertojen lukumäärä on riittävän suuri ja päinvastoin. Päällysteen iän kasvulla ( $r = 0.63$ ) ja rakenteen alhaisella kantavuudella ( $r = -0.56$ ) on myös selvä vaikutus vaurioiden lisääntymiseen. Kuvasta 28 voidaan myös havaita, että vaurioitumattomien kohteiden (LVAU192 = 0) pisteet poikkeavat jonkin verran vaurioituneiden kohteiden muodostaman pistejoukon yleisestä suunnasta.

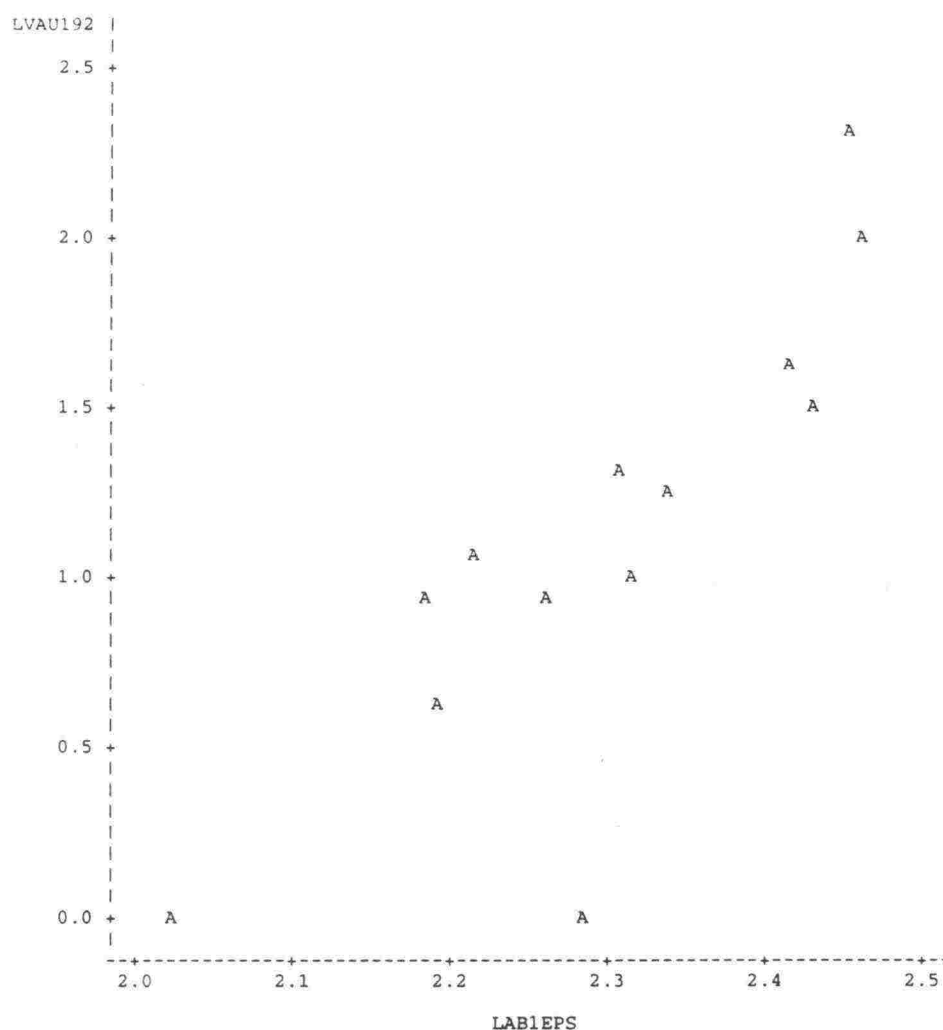
Tien rakennetiedoista, jotka selittävät myös muodonmuutoksia, merkittävimpiä vaurioitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat päällysteen paksuus ( $r = -0.66$ ) ja moduuli ( $r = -0.75$ ) sekä pohjamaan moduuli ( $r = -0.71$ ). Lisäksi rakenneker-rosten yhdysvaikutukset ovat merkityksellisiä. AB:n paksuus korreloi hyvin vaurioiden kanssa yhdessä AB:n moduulin ( $r = -0.87$ ), kantavan kerroksen moduulin ( $r = -0.65$ ) sekä pohjamaan moduulin ( $r = -0.78$ ) kanssa. Lisäksi AB:n moduulin sekä kantavan ja jakavan kerroksen moduulin ( $r = -0.72$  ja  $r = -0.82$ ) samoin kuin pohjamaan moduulin ( $r = -0.80$ ) yhteisvaikutuksella on selvä yhteys vaurioihin. Kuvassa 29 on esitetty AB:n paksuuden ja moduulin yhteisvaikutus vaurioihin. Myös tässä kuvassa voidaan havaita, että vaurioitu-mattomien kohteiden (LVAU192 = 0) pisteet poikkeavat jonkin verran vaurioi-tuneiden kohteiden muodostaman pistejoukon yleisestä suunnasta.

2AB + kant. rakenteiden vaurioitumista selittää merkittävimmin päällysteen alareunan vetomuodonmuutoksen (logaritmi) ja ensimmäisen päällystämisen jälkeisen kumulatiivisen kuormituskertaluvun (logaritmi) välinen yhdysvaikutus ( $r = 0.83$ , kuva 30). Myös vanhan päällysteen kokonaisuudella ( $r = 0.62$ ) on selvä vaikutus uuden päällysteen vaurioiden määrään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että päällysteen kestävyyyden vaikuttaa myös vanhan päällys-teen ikä tai sen kunto ennen uudelleenpäällystämistä. Sen sijaan kantavuus selittää vaurioitumista vain vähän johtuen kantavuuden ja vaurioiden välisestä suuresta hajonnasta.

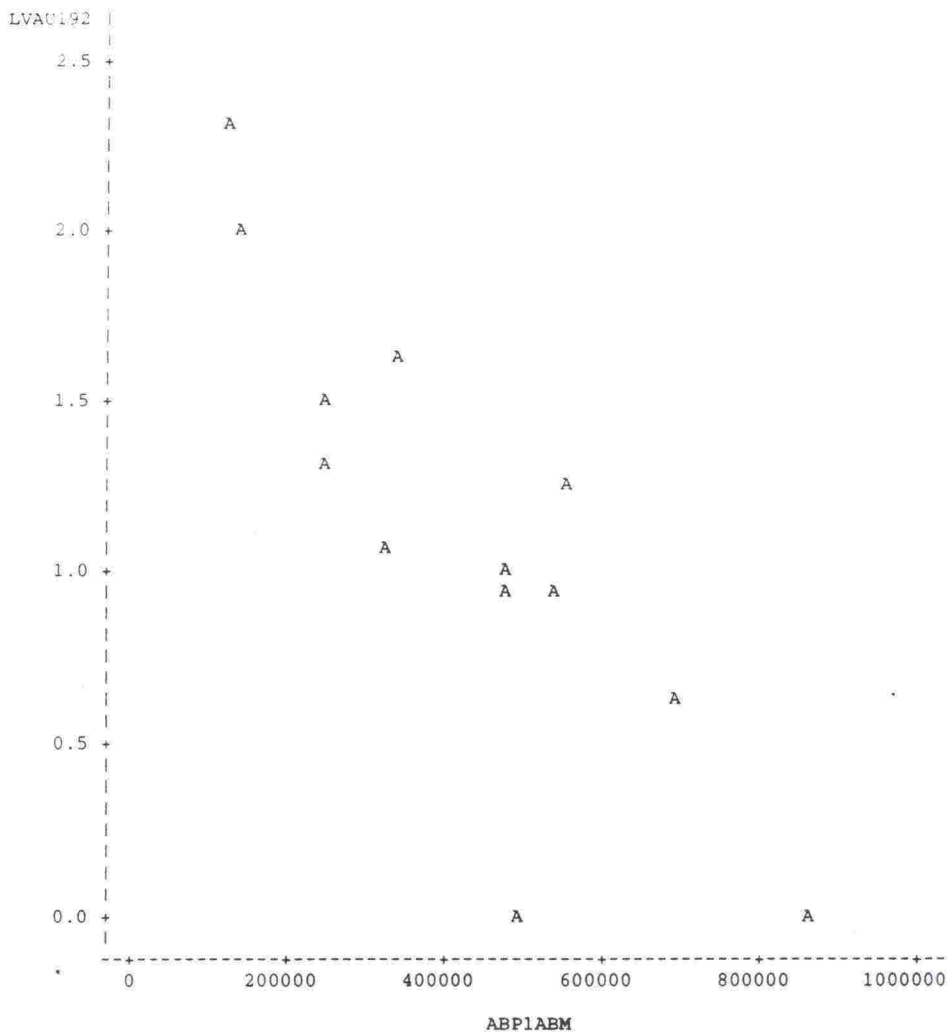


Taulukko 1. Korrelaatio logaritmissen vaurioiden yhteisumman ja riippumattomien muuttujien välillä.

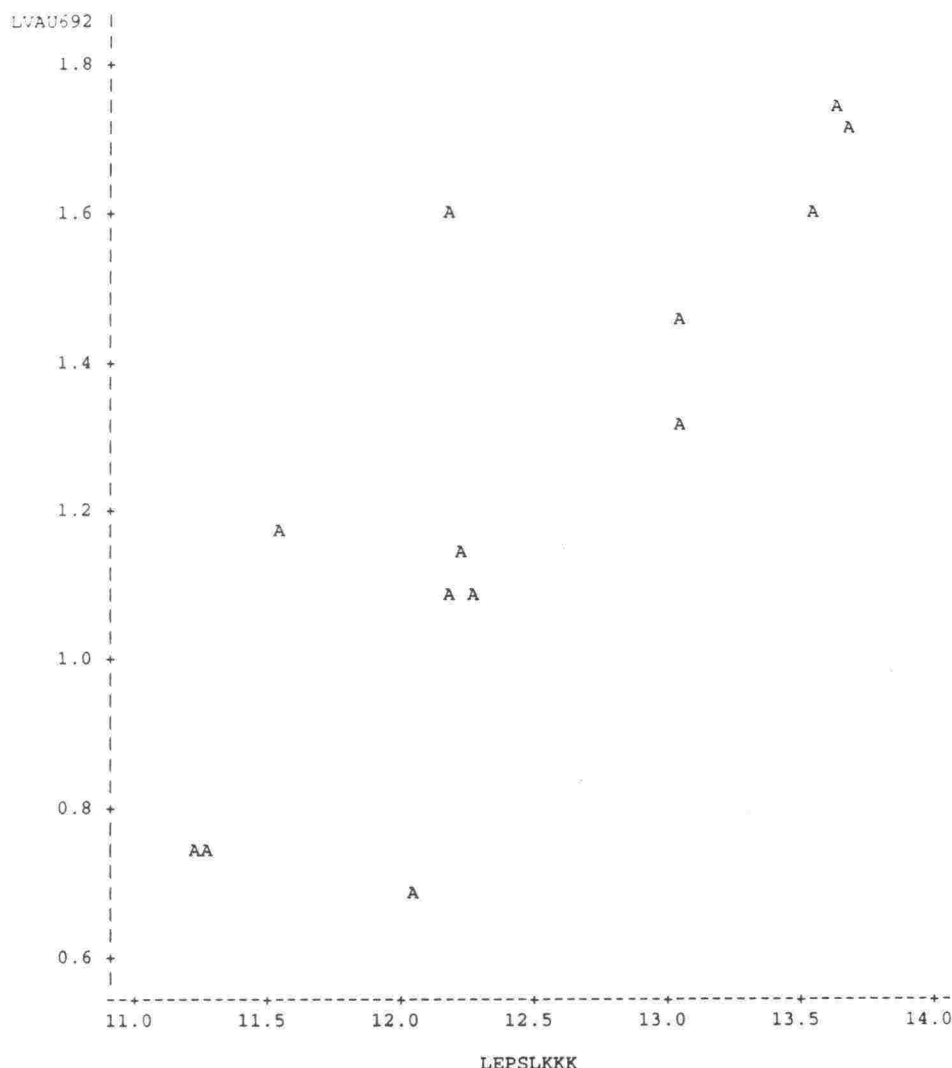
MUUTTUJA	KORRELAATIOKERROIN (r)	
	AB + KANT.	2AB + KANT.
AB:n paksuus	-0.66	-0.56
Kantavan paksuus	0.54	-0.39
Jakavan paksuus	-0.09	-0.39
AB:n moduuli	-0.75	0.15
Kantavan moduuli	-0.30	0.29
Jakavan moduuli	-0.44	-0.05
Pohjamaan moduuli	-0.71	0.21
AB:n alapinnan log(muodonmuutos)	0.89	0.45
Pohjamaan muodonmuutos	-0.02	0.52
Log(kumulatiivinen KKL)	0.37	0.58
Uuden AB:n log(kumul. KKL)		0.69
Raskaan liikenneen määrä (%)	0.50	0.35
Log(muodonmuutos) * log (kumulatiivinen KKL)	0.73	0.83
Tien kokonaisikä	0.63	0.62
Uuden päällysteen ikä		0.64
Kantavuus	-0.56	-0.15
IRI	0.65	0.26
AB:n paksuus * jakavan paksuus	-0.44	-0.60
AB:n paksuus * AB:n moduuli	-0.87	-0.24
AB:n paksuus * kantavan moduuli	-0.65	-0.32
AB:n paksuus * pohjamaan moduuli	-0.78	-0.21
AB:n moduuli * kantavan moduuli	-0.72	0.28
AB:n moduuli * jakavan moduuli	-0.82	0.02
AB:n moduuli * pohjamaan moduuli	-0.80	0.26



Kuva 28. Summavaurion (logaritmi LVAU192) ja päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen (logaritmi LAB1EPS) välinen yhteys AB + kant. rakenteella.



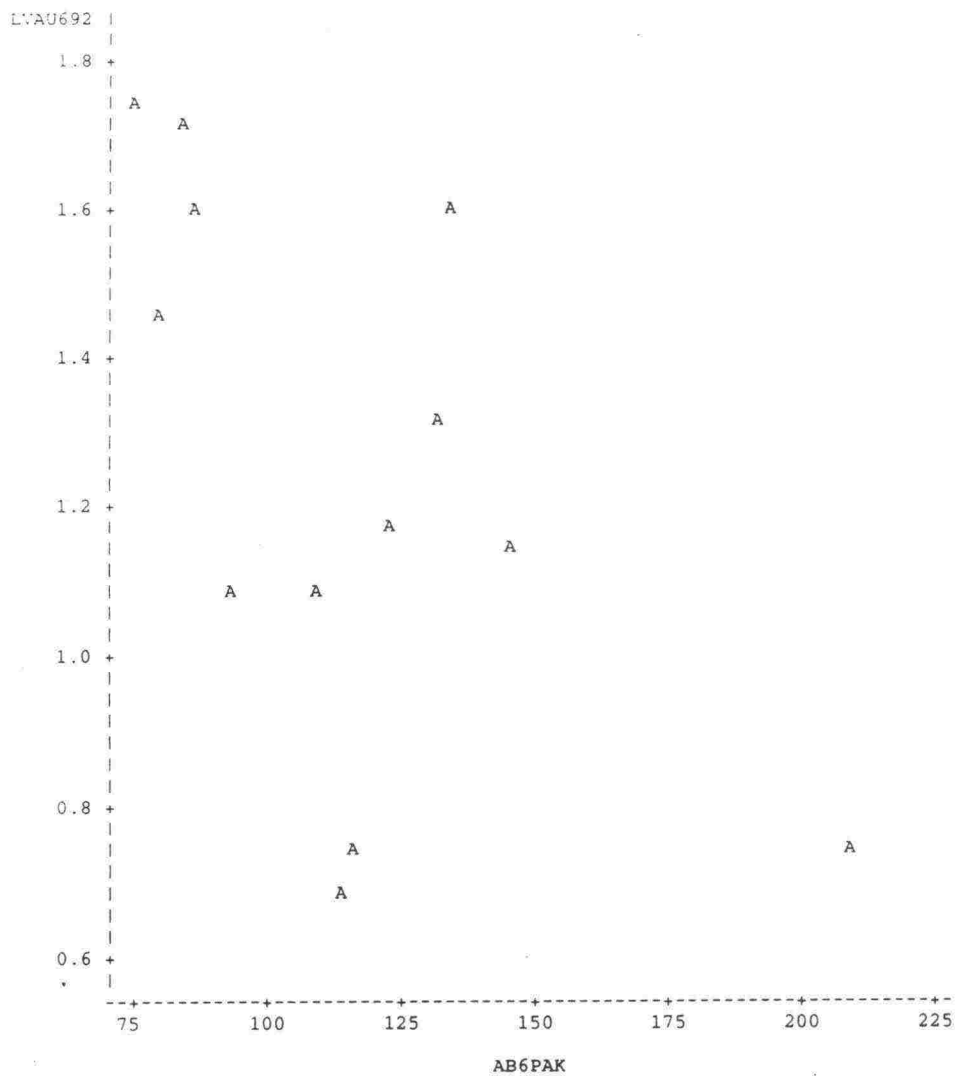
Kuva 29. Summavaurion (logaritmi LVAU192) sekä päällysteen paksuuden ja moduulin yhteisvaikutuksen ( $ABP1 * ABM$ ) välinen yhteys AB + kant. rakenteella.



Kuva 30. Summavaurion (logaritmi LVAU692) ja päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen ja kumulatiivisen kuormituskertaluvun (logaritmi LEPSLKKK) välinen yhteys 2AB + kant. rakenteella.

Tien rakennetiedoista 2AB + kant. kohteissa vaurioita selittää parhaiten päällysteen paksuus hajonnan ollessa kuitenkin selvä (kuva 31). Materiaali-moduulien arvot eivät korreloi hyvin vaurioiden kanssa kuten AB + kant. rakenteissa. Syynä tähän on todennäköisesti se, että uuden päällysteen vaurioituminen on riippuvainen vanhan päällysteen iästä, kuormituskerroista sekä kunnosta, minkä vuoksi nämä muuttujat tulisi pyrkiä sisällyttämään vauriomalleihin. Lisäksi materiaali-moduulin arvo vanhan päällysteen osalta ei ole vaurioitumisen vuoksi välttämättä sama kuin uuden päällysteen moduuli-arvo, vaikka laskelmissa ne on yhdistetty yhdeksi sitomattomaksi kerrokseksi niiden ohuuden vuoksi. Tämä aiheuttaa omalta osaltaan virhettä. Tämän vuoksi tulisi jatkossa tarkastella sidottuja kerroksia kahdessa kerroksessa määrittämällä moduuli-arvot kullekin kerrokselle erikseen.





Kuva 31. Summavaurion (logaritmi LVAU692) ja päällysteen paksuuden (AB6PAK) välinen yhteys 2AB + kant. rakenteella.

## 12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta päällysteen alapinnan muodonmuutoksen ja kuormituskertaluvun yhdysvaikutuksen selittävän vaurioitumista hyvin. Tämä viittaa siihen, että tierakenteen käyttäytymiseen eli analyttiseen tarkasteluun perustuva lähestymistapa soveltuu tierakenteiden mitoitusmenetelmäksi. Lisäksi tulokset osoittavat, että SHRP-aineiston avulla on mahdollista kehittää yhteys tierakenteen käyttäytymisen ja vaurioitumisen välille. Tämä puolestaan luo potentiaaliset mahdollisuudet pienentää niitä epävarmuustekijöitä, jotka liittyvät pelkän väsymissuoran hyväksikäyttöön kestoikäanalyyseissä.

Tutkimustulokset osoittavat myös tien rakennetietojen (kerrospaksuudet, moduulit) selvän vaikutuksen vaurioitumiseen. Tärkeimpiä kuntoon vaikuttavia muuttujia ovat päällysteen paksuus ja moduuli niissä rakenteissa, joissa on vain yksi päällystekerros. Kahden päällystekerroksen omaavissa kohteissa merkittävin rakenneselittäjä on päällysteen paksuus. Sen sijaan materiaalmoduulien ja vaurioiden välinen korrelaatio ei ole kovin hyvä 2AB + kant. rakenteilla. Tähän on syynä ilmeisesti se, että uuden päällystekerroksen kestävyys vaikuttaa ensimmäisen päällysteen tila (kunto) ja kuormitushistoria. Tähän aihepiiriin liittyvää tietoutta ei hallita tällä hetkellä riittävän hyvin, minkä vuoksi SHRP-aineisto antaa hyvät mahdollisuudet selvittää vanhan päällysteen ominaisuuksien vaikutukset vaurioitumiseen. Näyttää myös siltä, että rakenteiden vaurioitumisen hallinta on sitä vaikeampaa mitä useampi päällystekerros tiellä on. Esimerkiksi kantavuus selittää vaurioitumista huomattavasti vähemmän kahden päällystekerroksen omaavilla rakenteilla (2AB + kant.) kuin kohteissa, joissa on vain yksi päällystekerros (AB + kant.).

Jatkossa on ensisijaisen tärkeää, että koeteitä ei päällystetä esim. urautumisen takia ennen tien rakenteellista vaurioitumista (vaihtoehtona urapaikkaus). Tällä varmistetaan tutkimusinvestointien kannattavuus ja hyödyllisyys sekä tulosten käyttökelpoisuus myös tulevaisuudessa.

Tiedon analysoinnin osalta tulee jatkossa selvittää ilmastotietojen (pakkasmäärä, sademäärä jne.) vaikutus vaurioitumiseen. Lisäksi tulee selvittää laboratorioissa päällysteen jäykkyysmoduulin lämpötilaherkkyys sekä sitomattomien materiaalien moduulien muutokset eri jännitystiloissa. Näin voidaan vaurioitumisen mallintamisessa tarkastella entistä tarkemmin tierakenteen käyttäytymisessä tapahtuvia vuodenaikaisvaihteluita. Vauriomallien laadinnassa tulee ottaa huomioon vaurioitumisen luonne siten, että käytettävissä on mallit erikseen ensimmäisen vaurion esiintymistodennäköisyyden arvioimiseksi sekä mallit vaurioitumisen kehittymisen ennustamiseksi vaurioitumisprosessin alkamisen jälkeen.

### 13 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Strategic Highway Research Program (SHRP). Long-Term Pavement Performance (LTPP). Koeteillä tehdyt mittaukset ja tietojen tilastolliset analysointimenetelmät. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennelaboratorio. Tutkimusraportti 61. Espoo 1991.
2. Strategic Highway Research Program (SHRP). Long-Term Pavement Performance (LTPP). Koeteiden valinta ja tiedon analysointi. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio. Tutkimusselostus 824. Espoo 1990.
3. SHELL pavement design manual. Shell Limited. Lontoo 1978.

## 14 LIITTEET

1. SHRP - LTPP kohteet
2. Modulus-ohjelman tulostus
3. Esimerkki materiaalimoduulin vaihtelusta



## GPS-1

TUNNUS	PIIRI	TIE	TOSA
1101	1	53	16
1103	1	113	4
1113	4	132	11
1114	4	285	1
1115	4	308	1
1117	5	359	4
1118	5	387	9
1121	6	471	2
1122	6	471	3
1126	7	75	22
1127	7	486	4
* 1029	8	77	32
1130	9	604	4
* 1037	11	85	16
1138	11	85	28
1140	11	778	2
1142	12	86	18
1143	4	347	1

\* = Kohde on muuttunut GPS-6 kohteeksi.

## GPS-6

TUNNUS	PIIRI	TIE	TOSA
1602	1	53	29
1604	1	115	1
1605	1	167	5
1606	1	186	13
1607	2	186	1
1608	2	194	3
1609	4	12	12
1610	4	54	2
1611	4	66	7a
1612	4	66	7b
1616	4	324	2
1623	7	6	338
1624	7	6	348
1625	7	73	1
1628	8	23	403
1629	8	77	32
1631	9	622	2
1632	9	637	3
1633	9	637	4
1634	9	641	1
1635	10	67	39
1636	10	749	4
1637	11	85	16
1639	11	86	15
1644	4	325	1
1645	13	22	30
1646	2	192	6
1647	11	8	414

# III MODULUS ANALYSIS SYSTEM (SUMMARY REPORT)

HITE 2

(Version 4.0)

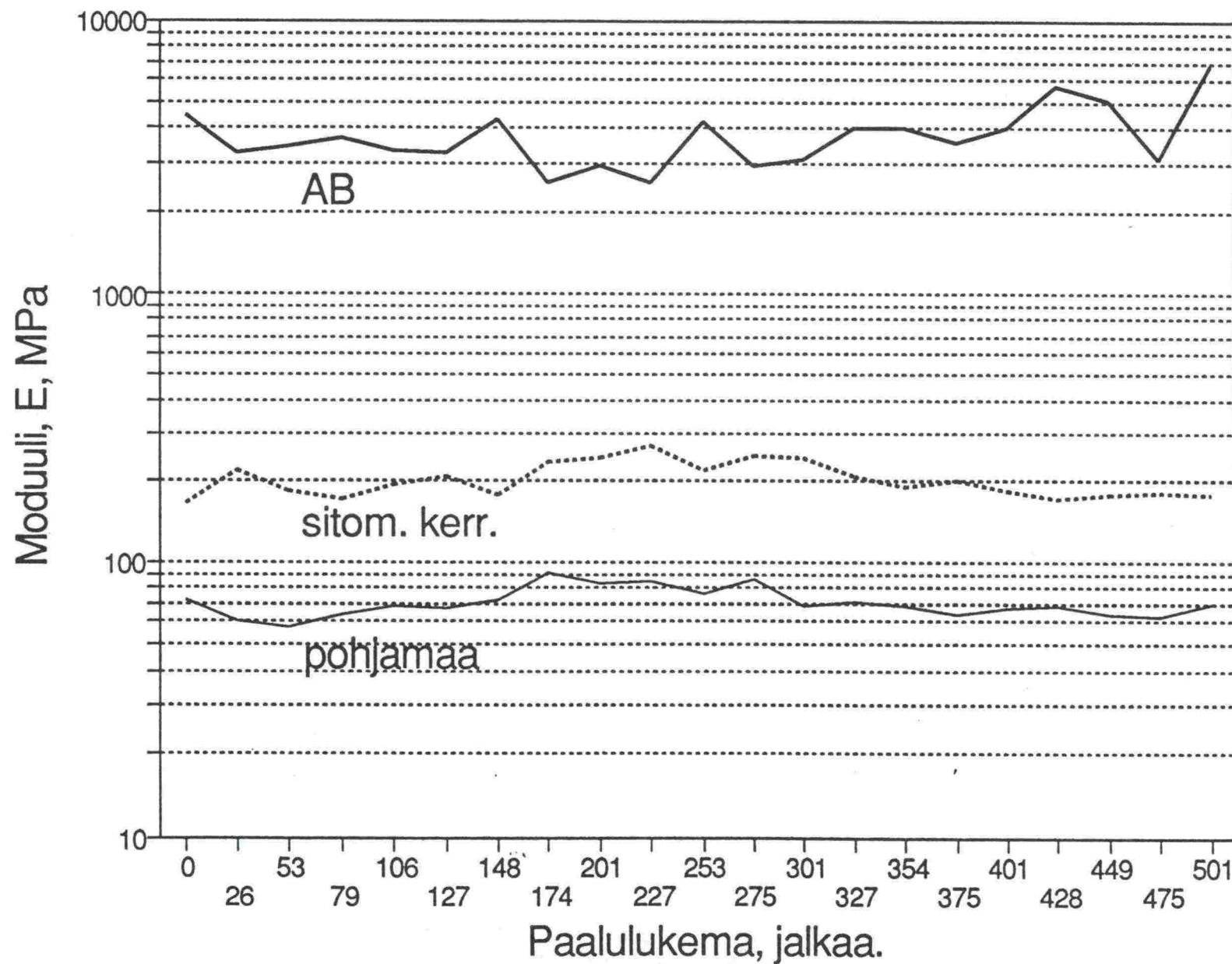
District: 30  
County: 1  
Highway/Road: shrp57

	Thickness(in)	MODULI RANGE(psi)	
		Minimum	Maximum
Pavement:	5.70	100,000	1,000,000
Base:	36.60	10,000	150,000
Subbase:	0.00	0	0
Subgrade:	257.70	20,000	

Station	Load (lbs)	Measured Deflection (mils):							Calculated Moduli values (ksi):				Absolute ERROR/Sens.	Depth to Bedrock (tuumaa)
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	SURF(E1)	BASE(E2)	SUBB(E3)	SUBG(E4)		
0.000	11,756	15.43	12.13	10.20	8.15	6.69	4.61	2.87	585.	33.3	0.0	12.9	0.94	300.00
0.005	11,597	14.37	11.22	9.53	7.48	6.14	4.37	2.72	579.	37.0	0.0	13.2	0.46	300.00
0.008	11,550	15.59	11.73	9.80	7.64	6.18	4.49	2.87	412.	38.3	0.0	12.5	0.38	300.00
0.015	11,502	15.59	11.65	9.57	7.68	6.18	4.49	2.83	408.	38.1	0.0	12.5	0.88	300.00
0.019	11,470	14.57	11.77	9.88	7.91	6.42	4.53	2.87	631.	34.0	0.0	12.6	0.65	300.00
0.024	11,375	16.42	12.20	10.12	7.91	6.46	4.61	2.95	369.	35.4	0.0	12.0	0.79	300.00
0.028	11,407	15.87	11.61	9.53	7.83	6.26	4.53	2.91	367.	39.5	0.0	11.9	1.76	300.00
0.033	11,343	15.43	11.69	9.57	7.40	6.10	4.49	2.95	371.	40.2	0.0	11.9	0.42	300.00
0.038	11,295	16.38	12.32	10.20	7.91	6.42	4.53	2.89	367.	35.8	0.0	12.0	0.76	300.00
0.043	11,359	16.73	13.11	10.83	8.43	6.81	4.72	3.07	438.	31.5	0.0	11.9	0.94	300.00
0.047	11,359	15.43	12.48	10.39	8.15	6.57	4.61	3.03	537.	32.7	0.0	12.1	1.16	300.00
0.052	11,295	17.13	13.23	10.12	8.39	6.50	4.76	3.19	320.	35.7	0.0	11.3	2.28	300.00
0.057	11,264	15.94	12.05	10.04	7.95	6.50	4.69	3.07	398.	37.1	0.0	11.3	0.70	300.00
0.062	11,216	17.76	12.20	9.96	7.80	6.26	4.53	2.87	239.	35.1	0.0	12.0	1.46	300.00
0.066	11,248	17.01	12.01	9.92	7.84	6.18	4.45	2.76	288.	37.2	0.0	12.6	1.21	300.00
0.071	11,152	17.01	12.83	9.61	8.31	6.20	4.61	2.99	298.	36.4	0.0	11.7	2.36	300.00
0.076	11,200	17.13	12.99	10.55	8.03	6.42	4.37	2.87	246.	32.1	0.0	12.8	1.16	300.00
0.081	11,216	16.93	12.40	10.00	7.99	6.30	4.41	2.91	317.	35.6	0.0	12.3	1.42	300.00
0.085	11,200	18.43	12.95	10.51	8.07	6.46	4.57	2.91	248.	34.5	0.0	12.2	0.89	300.00
0.090	11,184	17.01	12.99	10.67	8.31	6.61	4.65	3.07	368.	32.7	0.0	11.7	0.95	300.00
0.095	11,152	17.17	12.72	10.35	8.03	6.34	4.49	2.95	317.	34.2	0.0	12.2	0.85	300.00
0.106	11,168	14.80	11.54	9.49	7.44	5.98	4.21	2.83	454.	37.0	0.0	12.7	1.17	300.00
-0.009	11,137	15.91	12.32	10.31	8.07	6.61	4.72	2.99	449.	33.8	0.0	11.6	0.36	300.00
0.000	11,248	13.15	10.63	9.13	7.32	5.98	4.33	2.72	739.	37.0	0.0	12.8	0.16	300.00
0.005	11,137	12.36	9.96	8.58	6.85	5.63	4.06	2.60	759.	39.8	0.0	13.3	0.37	300.00
0.010	11,121	12.28	9.72	8.39	6.69	5.51	3.98	2.60	699.	42.3	0.0	13.2	0.65	300.00
0.015	11,105	12.76	9.88	8.50	6.81	5.63	4.09	2.68	606.	43.3	0.0	12.6	0.77	300.00
0.019	11,073	12.87	10.39	8.74	7.05	5.75	4.17	2.72	661.	39.8	0.0	12.6	0.57	300.00
0.024	11,105	14.21	11.06	9.25	7.32	5.98	4.21	2.76	510.	37.7	0.0	12.6	0.82	300.00
0.029	11,105	13.46	10.71	9.13	7.26	5.94	4.25	2.86	617.	38.3	0.0	12.4	0.68	300.00
0.033	11,121	12.76	10.24	8.66	6.85	5.67	4.21	2.87	594.	44.1	0.0	11.9	0.88	300.00
0.038	11,105	13.66	10.51	8.70	6.93	5.79	4.29	2.87	451.	44.9	0.0	11.7	0.43	300.00
0.043	11,073	14.17	11.14	9.33	7.44	6.10	4.41	2.99	507.	39.4	0.0	11.5	0.60	300.00
0.047	11,073	13.23	10.39	8.80	7.17	5.91	4.33	2.91	585.	42.3	0.0	11.5	0.76	300.00
0.052	11,104	14.29	10.91	9.13	7.24	5.98	4.37	3.07	423.	43.6	0.0	11.2	0.94	300.00
0.057	11,105	13.35	10.33	8.78	7.13	5.87	4.41	3.07	502.	46.2	0.0	10.9	0.73	300.00
0.062	11,137	13.62	11.02	9.17	7.28	5.94	4.33	2.87	574.	39.0	0.0	12.1	0.85	300.00
0.067	11,105	13.80	10.94	9.13	7.17	5.87	4.25	2.76	529.	38.6	0.0	12.5	0.43	300.00
0.071	11,069	13.62	10.75	9.17	7.32	5.98	4.29	2.76	607.	37.3	0.0	12.4	0.55	300.00
0.076	10,994	12.93	10.67	9.06	7.20	6.02	4.25	2.80	715.	37.2	0.0	12.3	1.01	300.00
0.081	10,994	14.02	11.02	9.29	7.32	5.94	4.25	2.83	522.	37.6	0.0	12.2	0.74	300.00
0.085	10,978	13.31	10.75	9.17	7.28	5.98	4.25	2.80	654.	37.1	0.0	12.3	0.73	300.00
0.090	10,994	14.80	11.42	9.69	7.68	6.30	4.45	2.95	489.	36.4	0.0	11.6	1.00	300.00
0.095	10,940	14.49	11.38	9.72	7.68	6.30	4.49	2.91	547.	35.3	0.0	11.7	0.64	300.00
Mean:		14.94	11.51	9.56	7.59	6.15	4.41	2.96	480.	37.7	0.0	12.2	0.87	300.00
Std. Dev:		1.65	0.96	0.64	0.47	0.31	0.19	0.13	130.	3.5	0.0	0.6	0.45	0.00
Var. Coeff(%)		11.07	8.37	6.60	6.16	5.04	4.23	4.52	28.	9.2	0.0	4.6	51.21	0.00

keskiarvo  
(mils)

SHRP: FWD, Modulus. Mt 186, tosa 13.  
Rakennekerrosmoduulit. Oik. pyöräura.





## TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 12/1993 Meluesteet ja puisen meluesteen malli. TIEL 3200139
- 13/1993 Tielaitoksen hiekka- ja suolavarastoverkko vuonna 2010. TIEL 3200140
- 14/1993 Tie kokemusmaailmana. TIEL 3200141
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200143
- 17/1993 Asfalttipäällysteiden suunnitteluperusteiden vertailu nastattoman ja nastallisen liikenteen välillä, kirjallisuustutkimus. TIEL 3200144
- 18/1993 Tiehankkeiden liikennetaloudellisen kannattavuuden toteutuminen.
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus; Mittaukset ja havainnot. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 21/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 22/1993 Liikenneväylän vaikutukset lähiympäristön yhdyskuntarakenteeseen; Väestö-, työpaikka- ja elinkeinorakenteen muutokset vt 3 Helsinki - Tampere -tien vaikutusalueella. TIEL 3200148
- 23/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Geotekniikan informaatiojulkaisuja: Tiegeotekniikan yleiset suunnittelu-perusteet. TIEL 3200150
- 25/1993 Teknologien siirto, T<sup>2</sup> -keskuksen perustaminen. TIEL 3200151
- 26/1993 Pohjaveden suojausrakenteiden laadunvalvonta; Tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 27/1993 Valaisinpylväiden perustaminen; Ympäristäytön laadun ja tiivistämistavan vaikutus pilariperustuksen siirtymiin. TIEL 3200153
- 28/1993 Nastallisen ja nastattoman liikenteen päällysteet, yhteenveto. TIEL 3200154
- 29/1993 Tieinvestointien toteutustapa viidessä Euroopan maassa. TIEL 3200155
- 30/1993 Pasilan virastokeskuksen työmatka- ja työliikennetutkimus. TIEL 3200156
- 31/1993 Savo-Karjalan tiepiirin murskaustoiminnan kehittäminen.
- 32/1993 Tiemerkintöjen näkyvyys; Paluuheijastavuustutkimus Lapin tiepiirissä. TIEL 3200157
- 33/1993 Tiesuolan pohjavesivaikutusten mallintaminen Joutsenonkankaalla. TIEL 3200158
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159